

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikačnej techniky

Měření numerické apertury optických vláken
Measurement of the numerical aperture of optical fiber

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave 7.5.2010

.....
Podpis

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petrovi Koudelkovi za cenné pripomienky, rady a odporúčenia pri riešení bakalárskej práce. Chcem poďakovať aj za umožnenie vstupu do laboratória, čo prispelo k vytvoreniu danej bakalárskej práce.

Abstrakt

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnuť a zrealizovať zariadenie pre meranie numerickej apertúry optických vlákien. Následne pomocou tohto zariadenia bola zmeraná numerická apertúra v laboratóriu na dostupných optických vláknach s konfiguráciou so zdrojom optického žiarenia v podobe LED a laserovej diódy. V prvej časti bakalárskej práce je popísaná celková problematika numerickej apertúry optických vlákien. Daná problematika vychádza z oblasti optické prenosové média a princíp šírenia svetla v optických vláknach.

Kľúčové slova:

Optické vlákno, prenosové prostredie, index lomu, vlnová dĺžka, princíp šírenia svetla, numerická apertúra, LED zdroj žiarenia, laser zdroj žiarenia.

Abstract

The main purpose of this thesis was to design and implement equipment for measuring the numerical aperture of optical fibers. Subsequently with this device was measured the numerical aperture of optical fiber available in a configuration with a source of optical radiation in the form of LEDs and laser diodes in the laboratory. In the first part, therefore, in the first part of the thesis describes the general problem of numerical aperture optical fiber. That issue is based on the optical transmission medium and the principle of propagation of light in optical fibers.

Key words:

Optical fiber, transmission environment, refractive index, wavelength, the principle of propagation of light, numerical aperture, LED source of radiation, laser radiation source.

Zoznam použitých symbolov a skratiek

APD	lavínová fotodióda s vnútorným ziskom
a	polomer optického jadra
DIR	signál smeru
d	priemer jadra
FC	optický konektor určený pre spájanie MM a SM vlákien
GaAs	arzenid gália
Ge	germánium
InGaAs	indium galium arzenity
LD	(Laser Diod) laserová dióda
LED	(Light-Emithing Diode) Led dióda
M	počet vedených vidov
MM-GI	mnohovidové vlákno s gradientnou zmenou indexu lomu
MM-SI	mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu
NA	numerická apertúra
n_0	index lomu vzduchu
n_1	index lomu jadra
n_2	index lomu plášťa
OPTO	väzbové napájanie
P	optický výkon
PIN	fotodióda bez vnútorného zisku
P_{\max}	maximálna intenzita optického výkonu
PUL	signálu impulzu
Si	kremík
SiO ₂	oxid kremičitý
SM-SI	jednovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu
V	normovaná frekvencia
z	vzdialená oblasť pri meraní numerickej apertúry
α_{NA}	odchýlka veľkosti numerickej apertúry vlákien
η	väzbová účinnosť
θ	činiteľ posunutia vlákien
θ_{\max}	maximálny nadväzujúci uhol
λ	vlnová dĺžka

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Optické prenosové prostredie	2
2.1	Vstupný väzbový člen	3
2.2	Výstupný väzbový člen	3
2.3	Fotodetektor	3
3	Optické vlákno (prenosové médium).....	5
3.1	Základne vzťahy v optických vláknach	6
3.2	Princíp šírenia svetla v optických vláknach	6
4	Numerická apertúra.....	9
4.1	Problémy spájania rôznych optických vlákien	10
4.1.1	<i>Odchýlka veľkosti numerických apertúr vlákien</i>	<i>11</i>
4.1.2	<i>Veľkosť vlákna a rozdielna NA</i>	<i>12</i>
4.1.3	<i>Uhlové posunutie vlákien</i>	<i>13</i>
4.2	Útlm v súvislosti s numerickou apertúrou.....	13
4.3	Meranie numerickej apertúry	15
5	Zdroje optického žiarenia.....	17
5.1	LASER dióda	17
5.2	LED dióda	18
6	Návrh zariadenia pre meranie NA optických vlákien	19
6.1	Realizácia zariadenia pre meranie NA optických vlákien.....	20
6.1.1	<i>Krokový motorček 57HS04</i>	<i>20</i>
6.1.2	<i>Driver krokového motorčeka M415B.....</i>	<i>20</i>
6.1.3	<i>Ovládacie rozhranie driveru krokového motorčeka.....</i>	<i>21</i>
6.1.4	<i>Zdroj napájania.....</i>	<i>24</i>
6.1.5	<i>Zhotovené zariadenie na meranie NA optický vlákien</i>	<i>24</i>

6.2	Postup merania NA pomocou ovládacieho rozhrania driveru.....	26
6.3	Cenová kalkulácia použitých súčiastok.....	27
7	Meranie NA vlákien pomocou navrhnutého zariadenia.....	31
7.1	Zdroj žiarenia v podobe laserovej diódy.....	31
7.1.1	<i>Jednovidové optické vlákno (9/125 μm).....</i>	<i>31</i>
7.1.2	<i>Špeciálne optické vlákna SG1005,SG1006,SG1017 (cca 40/125 μm).....</i>	<i>32</i>
7.1.3	<i>Mnohovidové optické vlákno (62,5/125 μm).....</i>	<i>33</i>
7.2	Zdroj žiarenia v podobe LED diódy.....	33
7.2.1	<i>Mnohovidové optické vlákno (50/125 μm).....</i>	<i>33</i>
7.2.2	<i>Mnohovidové optické vlákno (62,5/125 μm).....</i>	<i>34</i>
8	Záver	35
	Použitá literatúra	36
	Zoznám príloh	38

1 Úvod

História vláknovej optiky sa datuje viac ako 200 rokov späť. Už v roku 1840 Daniel Collodon a Jacques Babinet preukázali, že svetlo môže byť vedené pozdĺž striekajúcej vody. Na začiatku dvadsiateho storočia bolo zistené, že ohnuté sklenené tyčky vedú svetlo. V roku 1930 Heinrich Lamm po prvý krát demonštroval prenos obrazu pomocou zväzku optických vlákien a tak to išlo ďalej až k dnešným optickým vláknam. V dnešnej dobe je prenos po optických vláknach vo veľkom rozvoji a použitie má stále širší charakter. Optická vlákna sa využívajú v telekomunikačnej technike, v zabezpečovacej technike a tiež v lekárstve a i v iných technických oblasti. Z dôvodu veľmi širokého využitia optických vlákien v dnešnej dobe sa tiež musíme zaoberať numericou apertúrou optických vlákien.

A práve numericou apertúrou sa zaoberá táto bakalárska práca. Celkovo pozostáva z troch hlavných bodov. Prvý bod popisuje problematiku numerickej apertúry optických vlákien. V skratke by sa dalo napísať, čo vlastne vyjadruje, ako sa dá vypočítať a zmerať, problémy so spájaním dvoch vlákien s rôznymi parametrami a podobné. Pred samotným bodom bolo treba vysvetliť základne oblasti v optike. Jednou z týchto oblastí je práve optické prenosové prostredie, ktoré sa skladá zo vstupného, výstupného väzbového člena detektoru (v mojom prípade fotodetektoru). Potom bolo možné prejsť k prenosovým médiám, kde boli popísané základné informácie. Čo sa týka základných informácií tak sa nemohlo zabudnúť na index lomu a vlnovú dĺžku. A nakoniec samotný princíp šírenia svetla v optických vláknach pomocou geometrickej optiky.

V druhej časti je návrh a následná realizácia zariadenia na meranie numerickej apertúry optických vlákien. Zariadenie sa ovláda pomocou ovládacieho rozhrania, ktoré nahrádza činnosť PC. Je to vlastne mala krabička, ktorá obsahuje mikroprocesor a ovládacie prvky. Ostatné tri časti krokový motorček, driver krokového motorčeka a zdroj napájania sa dajú normálne kúpiť. Na danom krokovom motorčeku bola umiestnená meracia časť, ktorá sa skladala so súčiastok od firmy Thorlabs. Podobne aj fotodetektor, či laserový zdroj žiarenia bol od tejto firmy.

V poslednej časti sa zariadenie skúšalo a to tak, že sa merala numerická apertúra na dostupných vláknach s použitím dvoch zdrojov žiarenia v podobe LED diódy a laserovej diódy. Celkovo sa zmeralo šesť optických vlákien.

2 Optické prenosové prostredie

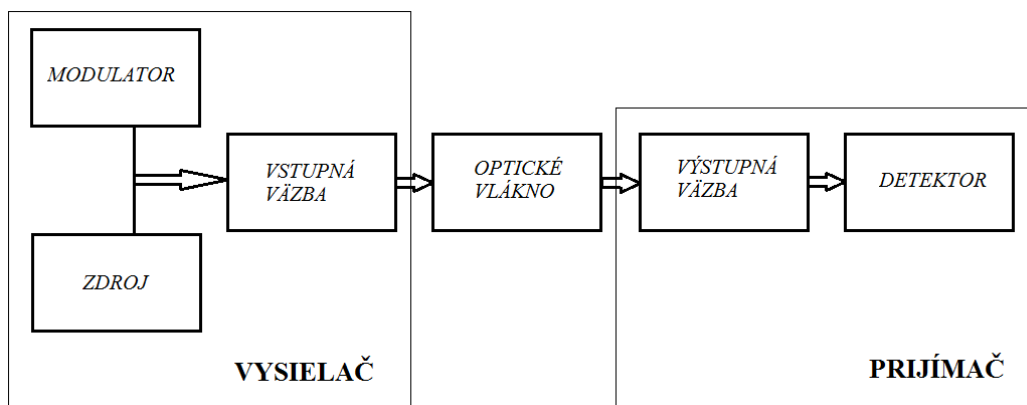
Viditeľné svetlo, ktoré má frekvenciu približne okolo 10^{14} Hz. Táto oblasť je veľmi lákavá pre použitie k prenosu dát. Prenesené číslcová dáta môžeme reprezentovať pomocou svetelných impulzov (prítomnosť svetelného impulzu reprezentuje napr. logickou 1, naopak neprítomnosť logickou 0).

Pre praktickú realizáciu prenosu avšak potrebujeme celý optický prenosový systém, ktorý sa skladá z nasledujúcich troch častí a je znázornený na obrázku 1:

- emitor (zdroj) žiarenia,
- prenosové médium (optické vlákno),
- detektor (prijímač) žiarenia

Emitorom (zdrojom) žiarenia môže byť elektroluminiscenčná dióda LED (Light Emitting Diode) alebo nákladnejšia laserová dióda LD (Laser Diode). Tieto diódy patria do polovodičových prvkov (emisie svetelného žiarenia prebieha na základe privátneho budiaceho prúdu).

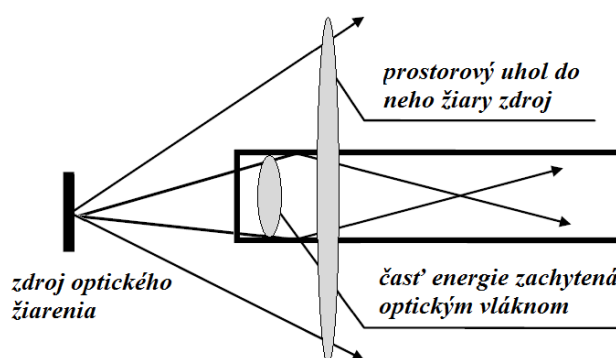
Detektorom (prijímačom) žiarenia býva fotodióda (Photodiode). Hlavnou úlohou je prevod svetelných impulzov na elektrický signál. [3,8]



Obr. 1: Bloková schéma optickej komunikačnej sústavy [11]

2.1 Vstupný väzbový člen

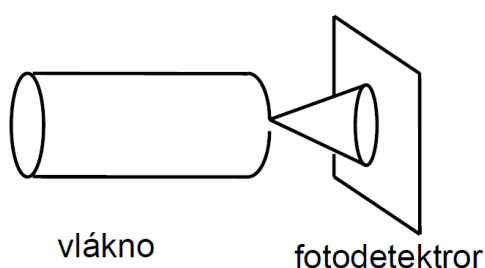
Prispôsobuje vyžarovaciu charakteristiku zdroja tzv. NA optického vlákna. Prispôsobenie ide realizovať optickou sústavou, ktorá zároveň transformuje výstupný zväzok tak, aby bol efektívne naviazaný do vlákna o nepatrnom priemeru (8 - 100 μm). Tento člen je znázornený na obrázku 2. [5]



Obr. 2: Vstupný väzbový člen [5]

2.2 Výstupný väzbový člen

Realizuje väzbu vlákno – fotodetektor, čo je znázornené na obrázku 3. V optických systémoch sa väčšinou používa priama väzba, ktorá môže byť veľmi účinná, pretože energia vyžarovaná vláknom sa ľahko zachytí fotodetektorom, ktorý má citlivú plochu podstatne väčšiu, ako je pričný rozmer vlákna. [5]



Obr. 3: Výstupný väzbový člen [11]

2.3 Fotodetektor

Realizuje prevod optického signálu prenesené optické vlny na elektrický prúd. K fotodetekcií sa najčastejšie používajú rôzne typy polovodičových fotodiód a to hlavné:

- **fotodióda PIN**
 - fotodióda bez vnútorného zisku, do jej štruktúry je pridaná špeciálna vrstva vlastného polovodiča zväčšujúca jej citlivosť a účinnosť
- **lavínová fotodióda s vnútorným ziskom APD (Avalanche Photo Diode)**
 - vo vnútri tejto diódy dochádza vplyvom silného elektrického poľa k lavínovému vzniku voľných elektrónov (primárne uvoľnené elektróny kvôli dopadu fotónov na prechod P-N sa tým účinné násobia), tým sa zväčšuje citlivosť v porovnaní s diódou PIN. Naopak komplikovanejšie sa vyrábajú, sú tiež drahšie a majú väčšiu úroveň napätia šumu.

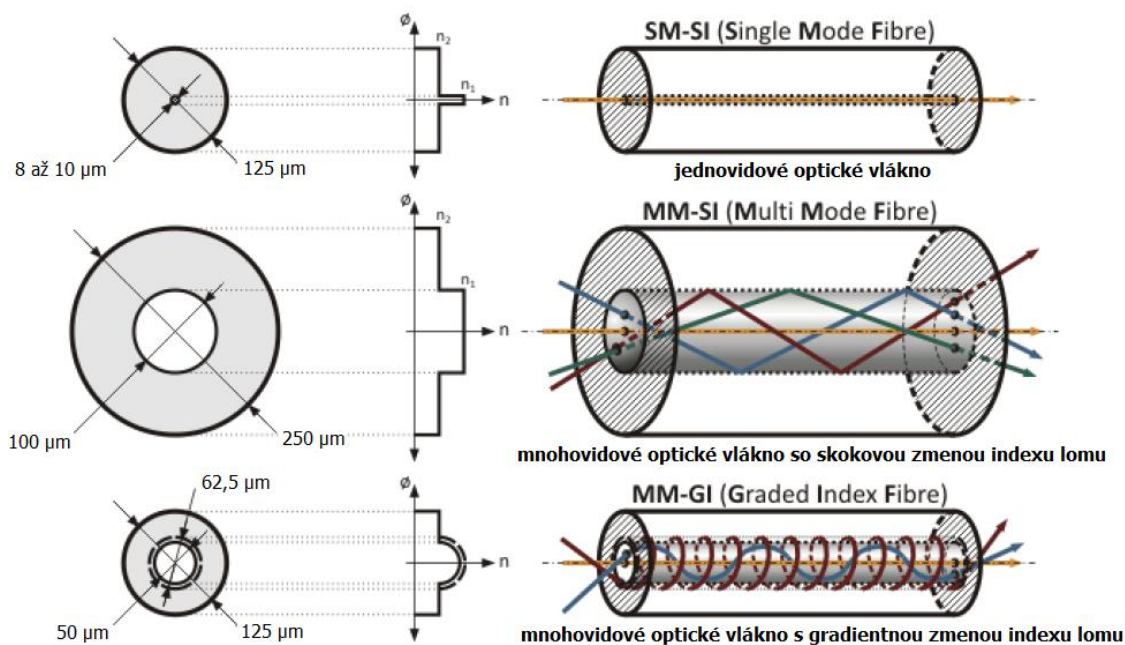
Prúd fotodiódy je priamo úmerný energii dopadajúceho optického žiarenia. Pretože časový priebeh energie tohto žiarenia je úmerný prenášanému signálu, je tiež prúd fotodetektoru úmerný prenášanému signálu. Základnými parametrami fotodetektoru je *spektrálna citlivosť* a *rýchlosť odozvy*. Materiály, ktoré majú dostatočnú pohltivosť svetla v pásme vlnových dĺžok, sú Ge, Si, GaAs, InGaAs. [1,3,9]

3 Optické vlákno (prenosové médium)

Úkolom prenosového média je dopraviť svetelný lúč od zdroje žiarenia k detektoru s čo možná najmenšími stratami. K tomuto účelu sa používa optické vlákno (Optical Fiber), s tenkým jadrom (Core) obaleným vhodným plášťom (Cladding). Jadro optického vlákna má priemer v radoch jednotiek až desiatok mikrometrov (8 až 10, 50, 62,5 alebo 100 μm). Najčastejšími používanými materiálmi sú rôzne druhy skla SiO_2 , eventuálne ide dnes najst' systémy, v ktorých ide využiť optických vlákien vyrobených z plastov (vyšší útlm, menšia prekenuateľná vzdialenosť ale o mnoho nižšie výrobné náklady). Optické vlákna ide rozdeliť na jednotlivé typy podľa spôsobu, ako dané optické vlákno vedie lúč. Na obrázku 4 môžeme vidieť tieto typy optických vlákien.

Podľa technológie výroby a prevozu optických vlákien sa vlákna delia na:

- jednovidové (SM-SI)
- mnohovidové so skokovou zmenou indexu lomu (MM-SI)
- gradientní s postupnou zmenou indexu lomu (MM-GI)



Obr. 4: Typy optických vlákien [8]

Optické vlákno sa skladá z plne transparentného jadra s indexom lomu n_1 , ktoré je obklopené plášťom s indexom lomu n_2 . Nutnou podmienkou je aby index lomu jadra bol väčší ako index lomu plášťa. [3,8]

3.1 Základne vzťahy v optických vláknach [4]

Index lomu je pomer rýchlosti svetla vo vákuu s rýchlosti svetla v danom materiáli. Je to bezrozmerná veličina a je väčšia ako 1. Rýchlosť svetla vo vákuu je asi 300 miliónov metrov za sekundu. Čím väčší je index lomu, tým pomalšie sa svetlo pohybuje v danom prostredí. Vzduch má index lomu 1,003. Voda má 1,33 a diamant 2,42 atď.

$$n = c/v \quad (1)$$

Vlnová dĺžka niekedy tiež označovaná ako priestorová perióda. Je to dĺžka ktorou vlna ubehne počas jedného kmitu. Označuje sa malým gréckym písmenom lambda. Závisí od frekvencie vlnenia a rýchlosti šírenia vlny.

$$\lambda = v/f \quad (2)$$

3.2 Princíp šírenia svetla v optických vláknach [6]

Prvý, kto demonštroval totálny vnútorný odraz ako základ optiky vedených vln, bol Tyndall (1820 - 1893). Vlnovú teóriu rozpracoval Gloge (1971). Pre popis šírenia svetla v optickom vlákne existujú dva postupy a to buď tzv. *vlnová optika* alebo *geometrická optika*.

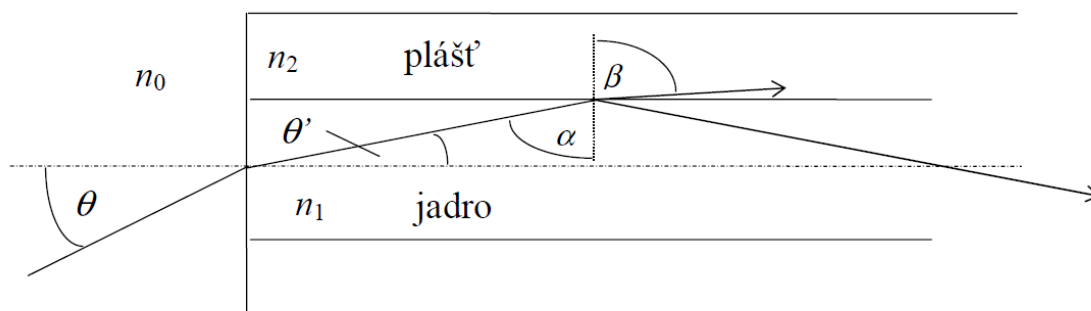
Prvý postup založený na **vlnovej optike** je založený na metóde, ktorá využíva k analýze elektromagnetickú teóriu šírenia vlnoploch na základe riešenia Maxwellových rovníc (k zvládnutiu tohto analytického postupu sú však nutné hlbšie znalosti z oblasti vyššej matematiky). Druhý postup už uplatňuje Snellov zákon odrazu a lomu. **Geometrická optika** zanedbáva vlnový charakter svetla, resp. šírenie svetla sa charakterizuje pomocou geometricky konštruovaných čiar – lúčov. Hovoríme teda o aproximácii elektromagnetickej vlny.

Pre popis teórie šírenia lúča je nutné vedieť:

- základnú štruktúru optického vlákna,
- Snellov zákon lomu svetla,
- jav totálneho vnútorného odrazu na rozhraní,

- maximálny uhol naviazaní do vlákna,
- numerickú apertúru

Princíp šírenia svetla vo vláknach objasním podľa teórie totálneho odrazu. Predpokladajme optické vlákno so skokovým indexom lomu, kde



Obr. 5: Šírenie svetla v optickom vlákne typu SI [6]

(n_0 - index lomu vzduchu, n_1 - index lomu jadra, n_2 - index lomu plášťa, θ - uhol dopadu svetla na čelo vlákna, θ' - uhol lomu svetla v jadre, α - uhol dopadu svetla na rozhraní jadra/plášťa, β - uhol lomu svetla v plášti).

Pre rozhranie vzduch/jadro platí Snellov zákon

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{n_1}{n_0} \quad (3)$$

a podobne pre rozhranie jadro/plášť platí

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Podmienkou šírenia svetla vo vláknu je vznik totálneho odrazu na rozhraní jadro/plášť. Musí byť splnená nerovnosť $n_1 > n_2$. Najväčší uhol dopadu na rozhraní jadro/plášť, pri ktorom dochádza k totálnemu odrazu označme α_{max} . (Pri totálnom odrazu je $\beta = \pi/2$ a $\sin \beta = 1$.)

Platí:

$$\sin \alpha_{max} = \cos \theta'_{max} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5)$$

$$\sin\theta'_{max} = \sqrt{1 - \cos^2\theta'_{max}}, \quad (6)$$

$$\sin\theta_{max} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \cos^2\theta'_{max}} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \approx (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx (2n_1\Delta)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

kde $\Delta = n_1 - n_2$ je rozdiel v indexoch lomu jadra a plášťa, pričom $n_1 \cong n_2$; $\Delta \ll 1$; θ_{max} je tzv. aperturný (príjmový) uhol vlákna. Veličina $\sin\theta_{max}$ sa definuje ako numerická apertúra (NA) optického vlákna a je mierou schopnosti vlákna prijať optický výkon.

Počet vedených vidov M (u vlákien typu SI a GI) ide vypočítať pomocou určitého parametru vlákna V („normované frekvencie“), ktorý je objasnený vo vlnovej teórii vlákien

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \cdot NA, \quad (8)$$

kde a je polomer jadra a λ_0 je vlnová dĺžka vo vákuu.

Pre $V \gg 1$ je

$$M \approx \frac{V^2}{2} \text{ (pre SI) a } M \approx \frac{V^2}{4} \text{ (pre GI)}. \quad (9)$$

Z vidovej teórie optických vlákien plynie tiež podmienka jednovidovosti. Pre optické vlákno typu SI sa jednovidosť zabezpečí pri $V < 2,405$. Potom ide odvodiť podmienku pre priemer jadra:

$$2a < 0,38 \frac{\lambda_0}{(NA)} \quad (10)$$

4 Numerická apertúra

Tak ako bolo už vysvetlene v kapitole princíp šírenia svetla v optických vláknach, tak numerická apertúra pracuje s jedným základným stredoškolským

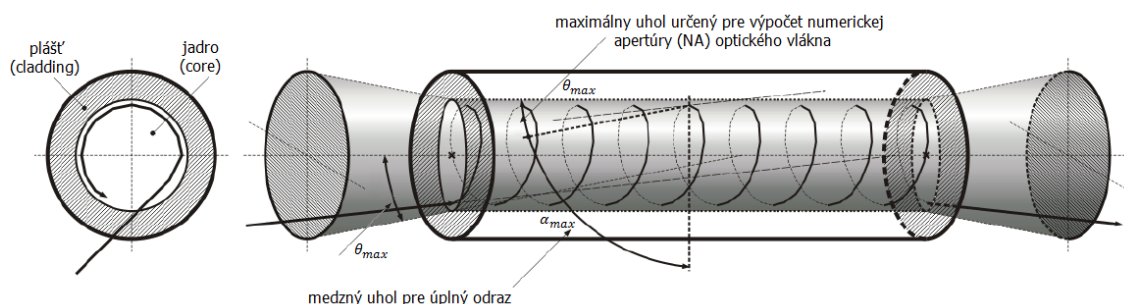
„Ak dopadá svetelný lúč na rozhraní dvoch prostredí s rôznymi optickými vlastnosťami (napr. na rozhraní medzi jadrom a plášťom), potom v obecnom prípade sa časť tohto lúča odrazí späť do pôvodného prostredia a časť prechádza do druhého prostredia. Záleží však na uhlu, pod ktorým lúč dopadá na rozhranie (ktoré je dané tiež optickými vlastnosťami oboch prostredí). Ak je tento uhol väčší ako určitý medzný uhol, dochádza k úplnému odrazu lúča späť do pôvodného prostredia.“

Z úvahy vyplýva, že v dôsledku opakovaných úplných odrazov, ktoré prebiehajú bez akýchkoľvek strát (reálne s minimálnymi stratami), potom svetelný lúč sleduje dráhu jadra optického vlákna, a tým následne ide povedať, že svetelný lúč je týmto jadrom vedený. Hodnota medzného uhlu, pod ktorým môže svetelný lúč dopadať na optické vlákno tak, aby bol následne vedený (s minimálnymi stratami), definuje práve tzv. *numerickú apertúru*. NA je dôležitý parameter pre posudzovanie účinnosti väzby medzi optickým zdrojom a optickým vláknom alebo medzi dvoma optickými vláknami či medzi optickým vláknom a optickým detektorom.

Je definovaná nasledujúcim vzťahom:

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (11)$$

kde n_0 - index lomu materiálu, z ktorého sa svetlo nadväzuje do vlákna, θ_{max} - maximálny uhol naviazaní, n_1 - index lomu jadra, n_2 - index lomu plášťa. [7,8]



Obr. 6: Vysvetlenie pojmu numerická apertúra [8]

Gradientní vlákna umožňujú šírenie viac vidov, ale špeciálne rozloženie indexu lomu umožňuje rýchlejšie šírenie vidmi neležiacimi v ose voči vidmi v ose vlákna, preto u týchto vlákien dochádza ku značnej redukcii disperzie pri zachovaní numerickej apertúry.

Jednovidové vlákna sú vyrobené tak, aby bolo umožnené šírenie iba osovým vidom. Priemer jadra jednovidových vlákien je relatívne malý (radovo niekoľko μm), disperzia je malá, a podobne aj numerická apertúra, čo signalizuje určité nároky pri zavedení optického výkonu do vlákna. [6]

typ vlákna	NA
MM-SI	0,3 až 0,4
MM-GI	0,20 až 0,27
SM-SI	0,08 až 0,15

Tab. 1: Uvedené hodnoty NA pre jednotlivé druhy optických vlákien [6]

n_1	n_2	θ_{\max}	NA
1,5	1,49	9,96 °	0,173
1,5	1,45	22,58 °	0,384
1,5	1,35	40,83 °	0,654
1,5	1,25	56,01 °	0,829

Tab. 2: Nasledujúca tabuľka uvádza niektoré parametre [4]

4.1 Problémy spájania rôznych optických vlákien

Obečné každý spoj v optickej komunikácii je možno považovať za väzbový člen, ktorý do spoja vnáša v porovnaní s metalickými vodičmi značný útlm. Pri spojení dvoch vlákien môže dôjsť k rôznym chybám. Vyvinutie dokonalej technológie pre spojovanie optických vlákien je teda veľmi dôležitá, pretože v každom spoji vznikajú straty. Ich pôvod je v rozdielnych vlastnostiach spojovaných vlákien (vplyvy vnútorné) a v nedokonalej geometrii spoja (vplyvy vonkajšie).

Vnútorné vplyvy sú spôsobené:

- zmenou priemeru jadra a primárnej ochrany spojovaných vlákien,
- neprispôbením indexu lomu,

- neprispôsobením numerických apertúr,
- eliptičnosťou a nesústredenosťou jadra a primárnej ochrany.

Vonkajšie vplyvy je možné znížiť kvalitnejšou technológiou spojenia. [1]

4.1.1 Odchýlka veľkosti numerických apertúr vlákien

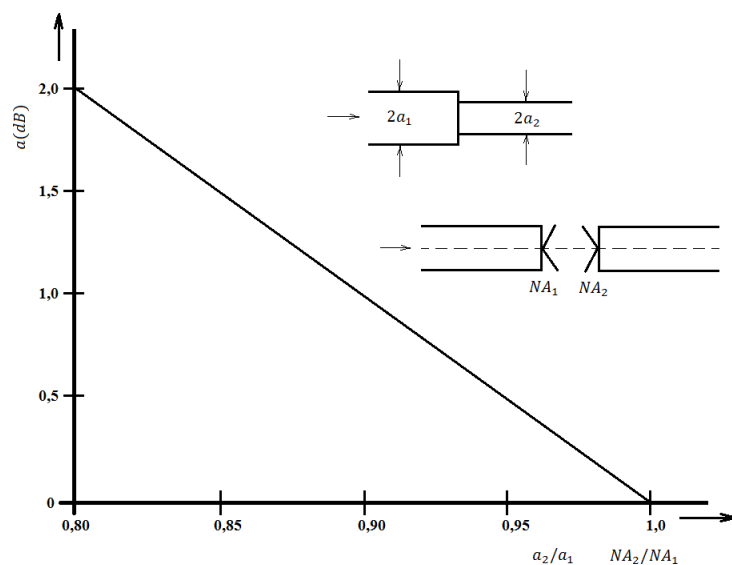
A práve s neprispôsobením numerických apertúr optických vlákien súvisí odchýlka veľkosti numerických apertúr vlákien. Jedná sa o prípad, kedy jadro vysielaného a jadro prijímaného vlákna má rozdielnú numerickú apertúru.

Výpočet je možné urobiť podľa vzťahu:

$$a_{NA} = -10 \log \left(\frac{NA_D}{NA_H} \right)^2, \quad (12)$$

kde NA_D je dolná hranica a NA_H je horný hranica odchýlky.

Podľa odporúčenia ITU-T by rozdiel napr. pre mnohovidové gradientné vlákno nemal byť väčší ako $NA = 0,2 \pm 0,02$. Po dosadení odchýlky NA do vzorca (12) dostaneme odchýlku $a_{NA} = 1,74 \text{ dB}$. Závislosť strát je graficky vyjadrená v obrázku 7. [1,2]



Obr. 7: Závislosť odchýlky a pomeru NA optických vlákien [1]

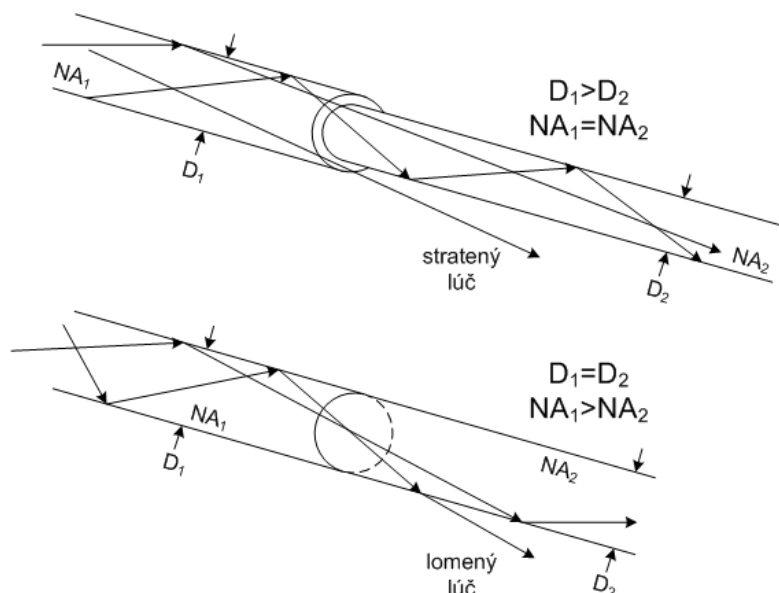
4.1.2 Veľkosť vlákna a rozdielna NA

Aj keď je to nežiaduce, vzniká útlm, keď je nutné spojiť vlákna s rôznymi veľkosťami a s rôznymi numerickými apertúrami. Ak je vlákno z ktorého svetlo vychádza väčšie ako vlákno, ktoré je určené ako príjemca svetla, potom svetelné lúče uniknú z okrajoch väčšieho vlákna. A ak dve vlákna majú rovnaký priemer, ale majú rôznu numerickú apertúru tak svetlo, ktoré vychádza z vlákna s väčšou numerickou apertúrou stratí malé množstvo energie cez lom do plášťa druhé vlákna. Ale keď vlákno, z ktorého svetlo vychádza má menší priemer alebo menšiu numerickú apertúru ako druhé vlákno, tak nedochádza k žiadnemu útlmu. Veľkosť útlmu v prvom prípade, keď NA prvého vlákna je väčšia ako druhého vlákna sa dá vypočítať pomocou vzorca 13. A ak priemer jadra prvého vlákna je väčší ako priemer jadra druhého vlákna tak pomocou vzorca 14. [2,12]

$$\alpha [\text{dB}] = 10 \log (NA_1/NA_2)^2 \quad \text{pre } NA_1 > NA_2 \quad (13)$$

$$\alpha [\text{dB}] = 10 \log (D_1/D_2)^2 \quad \text{pre } D_1 > D_2 \quad (14)$$

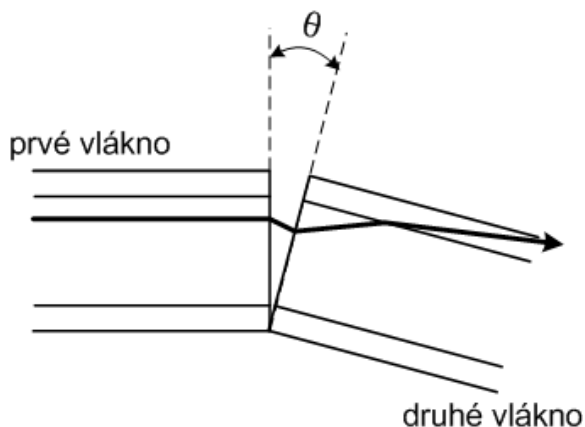
Na obrázku 8 je možné vidieť, ako sa časť lúčov stráca pri prechode medzi optickými vláknami. Vrchná časť obrázku odpovedá vzorcu 13 a spodná časť obrázku vzorcu 14.



Obr. 8: Závislosť odchýlky a pomeru NA optických vlákien [2]

4.1.3 Uhlové posunutie vlákien

Keď osi optických vlákien nie sú rovnaké, lúč (svetlo) z prvého vlákna vstupuje do druhého vlákna pod väčším uhlom a v závislosti na numerickej apertúre nie sú schopne niektoré lúče sa udržať v jadre vlákna. To je znázornené na obrázku 9.



Obr. 9: Uhlové posunutie vlákien [2]

Väzbová účinnosť η pre malé uhlové posunutia o uhol θ v radiánoch je daná vzťahom:

$$\eta = 1 - \frac{N_0 \cdot \theta}{\theta \cdot NA} \quad (15)$$

Útlm sa počíta ako:

$$\alpha = 10 \cdot \log \cdot \eta \quad [\text{dB}] \quad (16)$$

Útlm je menší pravé s väčšou numericou apertúrou, možno povedať že pri veľkých numerickej apertúr je žiarenie distribuované na veľké uhly. Pričom malé uhlové chyby ovplyvňujú menej celkový výkon. Pri väčšom indexu N_0 sa podobne zväčšuje aj daný útlm. [2]

4.2 Útlm v súvislosti s numericou apertúrou

Spolu s priemerom jadra optického káblu sa numerická apertúra podieľa na účinnosti väzby žiarenia do jadra a má tiež súvislosť s útlmom. Časté hodnoty apertúry sa pohybujú medzi 0,25 až 0,4. Pre $NA = 0,2$ je hodnota akceptačného uhlu iba 12° . A preto je pravda, že väzbová účinnosť svetla do vlákňového vlnovodu porastie s rastom priemeru jadra a s rastom

akceptačného uhlu. S rastom priemeru jadra avšak rýchlo rastie výrobná cena vlákna. Rast akceptačného uhlu θ_{max} ide zaistiť, iba zvyšovaným n_1 prostredníctvom vyššej dotácie základného materiálu (kremíkového skla). Toto vedie k zvýšeniu útlmu vlnovodu.

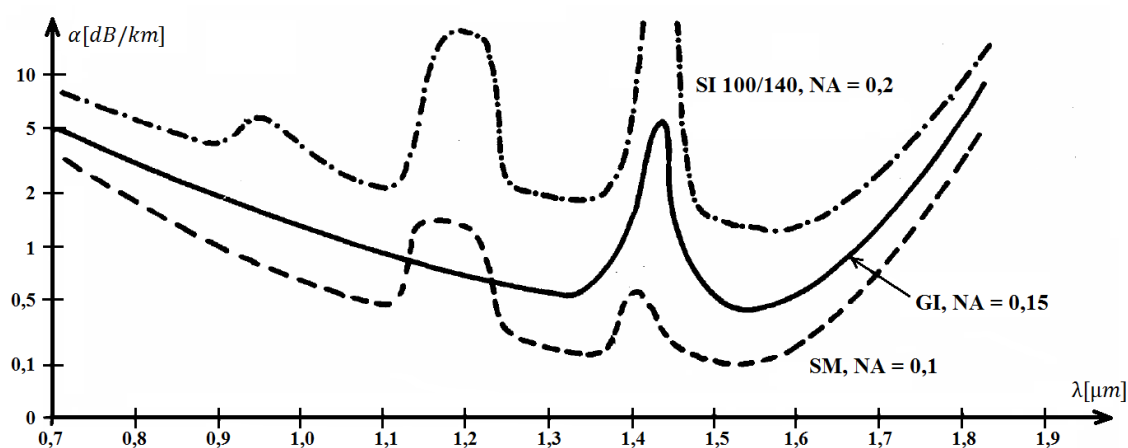
Útlm vo vlnovode spôsobuje pokles výkonu žiarenia naviazaného do jadra $P(O)$ podľa exponenciálneho zákona s dĺžkou vlákna l :

$$P(l) = P(O) \cdot 10^{-\frac{\alpha l}{10}} \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{10}{l} \log \frac{P(O)}{P(l)} \quad (18)$$

Činiteľ merného útlmu α je závislý na vlnovej dĺžke, jeho priebeh je ovplyvnený poklesom Rayleighova rozptylu s λ^{-4} pri rastúcej vlnovej dĺžky, rastom fotónovej absorpcie s λ^2 pri rastúcej λ , selektívnej molekulárnej absorpcie a prítomnosťou elektrónovej absorpcie kovu modifikujúcich index lomu materiálu jadra a aj plášťa vlnovodu.

Dnešné vláknové vlnovody s nízkymi úrovňami prímies a nečistôt vykazujú veľmi nízky útlm a to hlavne v troch vlnových oblastiach. Tzv. v oknách $0,8 \div 0,9 \mu m$, $1,25 \div 1,35 \mu m$ a $1,5 \div 1,69 \mu m$, viac obrazok 10. Najnižšie útlmy pre SiO_2 vlnovody sú dosahované v oblasti tretieho okna, tj. $\lambda = 1,55 \mu m$, kde $\alpha = 0,1$ dB/km. [6]



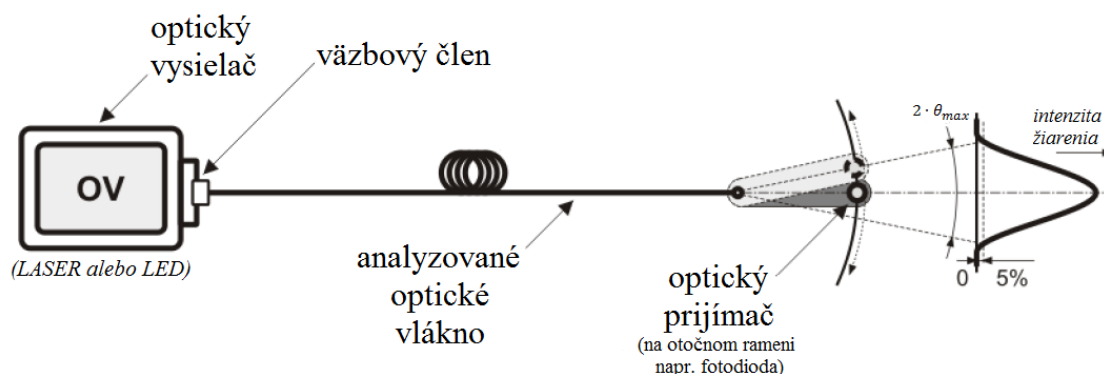
Obr. 10: Typické priebehy útlmu moderných vlákien, SI – stepindexový vlnovod, GI – gradientní vlnovod, SM – jednovidový vlnovod [6]

4.3 Meranie numerickej apertúry

Numerická apertúra je dôležitý parameter pre posudzovanie účinnosti väzby medzi optickým zdrojom a vláknom, resp. dvoma vláknami alebo medzi vláknom a detektorom

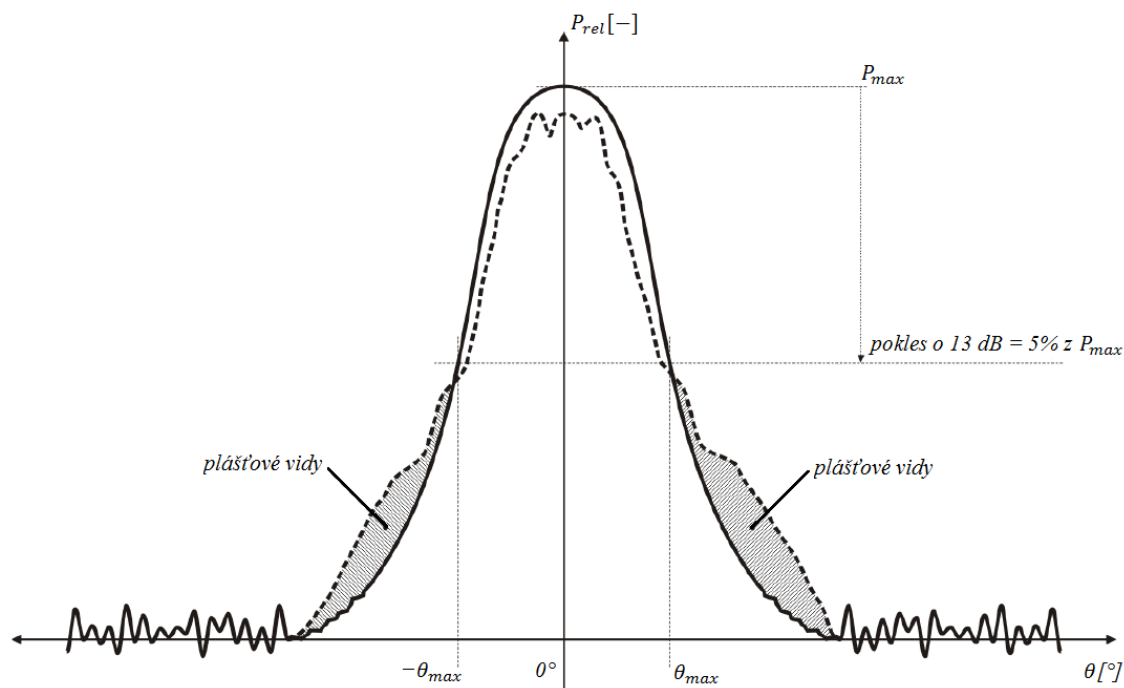
Vzhľadom k tomu, že určenie indexu lomu jadra n_1 a plášťa n_2 je niekedy veľmi ťažké, zisťuje sa numerická apertúra z priebehu vyžarovacej charakteristiky na výstupe krátkého úseku rovnomerné budeného optického vlákna, a to zo šírky vyžarovacej charakteristiky v 5% maximálnej intenzity (podľa odporúčenia IEC i EIA). Efektívna numerická apertúra sa zisťuje podobným spôsobom na dostatočne dlhom úseku optického vlákna s ustálenou distribúcií vidov (resp. s ustáleným rozložením vidov) a približne to činí 50% až 70% hodnoty teoretickej numerickej apertúry.

Optické vlákno je naviazané k optickému vysielacu (LASER alebo LED) prostredníctvom vhodného väzbového členu. Na výstupe optického vlákna je na otočnom ramene pevne upevnený optický prijímač (fotodióda), ktorá sníma vyžarovaciu intenzitu žiarenia v závislosti na veľkosti daného uhlu, meraného od osy optického vlákna. Metóda na meranie NA je znázornená na obrázku 11.



Obr. 11: Princíp merania numerickej apertúry [7]

V súčasnosti sa diskutuje, či odčítať hodnotu numerickej apertúry zo šírky vyžarovacej charakteristiky v 5% maximálnej intenzity (obrázok 12), čo reprezentuje pokles optického výkonu oproti maximálnej hodnote o 13 dB, alebo zo šírky v 10% maximálnej intenzity, čo reprezentuje pokles optického výkonu oproti maximálnej hodnote o 10 dB.



Obr. 12: Priebeh vyžarovacej charakteristiky gradientného optického vlákna (MM-GI) [7]

Meranie je nutné robiť v tzv. vzdialenej oblasti, tj. vo vzdialenosti z omnoho väčšej, ako je priemer meraného jadra optického vlákna. Pre vzdialenú oblasť musí platiť nasledujúca podmienka, definovaná vzťahom:

$$z \gg \frac{d^2}{\lambda} \quad (19)$$

kde d [m] je priemer jadra optického vlákna a λ [m] je pracovná vlnová dĺžka.

optické vlákno	jednovidové - (SM-SI)		gradientní - (MM-GI)	
priemer jadra	$d = 9 \mu\text{m}$		$d = 50 \mu\text{m}$	
vlnová dĺžka λ	1300 nm	850 nm	850 nm	1550 nm
vzdialenosť z	62 μm	2,94 mm	2,94 mm	52 μm

Tab. 3: Tabuľka hodnôt vzdialenosti z pre rôzne typy vlákien a vlnové dĺžky [7,8]

V praxi sa pre vzdialenosť z volí približne desaťnásobok vypočítanej hodnoty, tj. pre hodnoty v tabuľke 3 sa teda vzdialenosť z pohybuje od 0,5 mm do 3 cm. [7]

5 Zdroje optického žiarenia

Zdroje optického žiarenia ide charakterizovať ako systémové prvky, ktoré menia elektrický signál na optický. V oblasti telekomunikácii sa však takmer výhradne používajú polovodičové zdroje (pretože majú výhodné vlastnosti), ktoré využívajú ku generovaniu optického žiarenia rekombináciu injektovaných dier a elektrónu do oblasti polovodičového prechodu PN. Voľne nosiče sú do oblasti prechodu injektované priloženým napätím v priepustnom smere. Pre optické telekomunikácie prichádzajú v úvahu tieto druhy zdroju:

- nekoherentné – luminiscenčné polovodičové diódy (LED – Light Emitting Diode),
- koherentné – lasery: predovšetkým polovodičové (LD – Laser Diode), pre špeciálne použitie i lasery plynové, pevno látkové a barvivové.

Oba dva prvky (LED a LD) sú z pohľadu malých rozmerov, ľahkého napojenia na optické vlákno a ľahkej modulovateľnosti veľmi používané v telekomunikačnej praxi. Pre menej náročné aplikácie tam, kde nie je potreba dodržať smerovanie optického zväzku a pre prenosy na kratšie vzdialenosti, sa používajú polovodičové zdroje LED. Pre prenosy na väčšie vzdialenosti tam, kde je potreba vyžarovať v úzkom zväzku je potreba prenášať viac vlnových dĺžok (tzv. vlnový multiplex WDM), sa v zapojení používajú laserové polovodičové diódy (LD). Ako môžeme vidieť na obrázku 14, LED dióda má väčšiu šírku v polovine maxima výkonu ako laserová dióda. [1]

5.1 LASER dióda

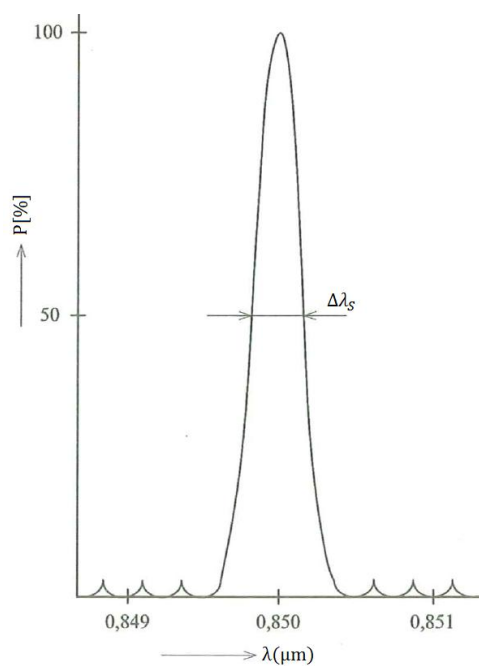
Laserové polovodičové zdroje (LD) sa vyznačujú väčším vyžarovaným výkonom, menšou spektrálnou šírkou, vysokou účinnosťou väzby na vlákno, možnosťou modulovať do väčších frekvencií (GHz), na strane druhej avšak vyžadujú vyššie napájanie, teplotnú stabilizáciu, sú najpravdepodobnejším miestom vzniku porúch na optických traktoch (robí sa zálohovanie, ich životnosť sa však neustále zvyšuje) a sú drahšie. Svetlo sa generuje stimulovanou emisiou (jeden elektrón budí druhého, pričom prvý nezaniká, ale vzniká tzv. reťazová reakcia). Týmto javom sa emitovaná energia násobí. Dôležitou vlastnosťou je rýchly nárast energie žiarenia pri budení strmým impulzom.

Jednovidové optické vlákna (SM-SI) vyžadujú pre svoje budenie laserové diódy. [1,12]

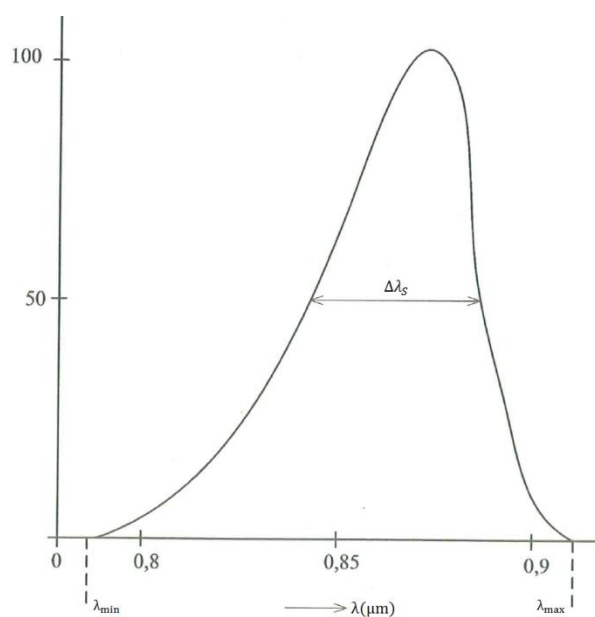
5.2 LED dióda

Pri prvom priblížení luminiscenčnej diódy (LED) sú lacnejšie, ľahko dostupné, majú dlhú životnosť, ľahko sa modulujú, majú avšak veľkú divergenciu výstupného zväzku a vyžarujú menší výkon (v porovnaní s LD), na všetkých vlnových dĺžkach vhodných pre telekomunikačné prenosy. LED diódy majú aj svoje medze použiteľnosti. Je to hlavné kvôli širokému v šírke smerovému vyžarovaciemu diagramu, ktorý je prekážkou pre účinné prispôsobenie na optické vlákno (predovšetkým na vlákno s malou numerickou apertúrou).

Mnohovidové optické vlákna (MM-GI) vyžadujú pre svoje budenie luminiscenčnú diódu (LED). [1,4]



Obr. 13: Spektrálna charakteristika laseru [1]

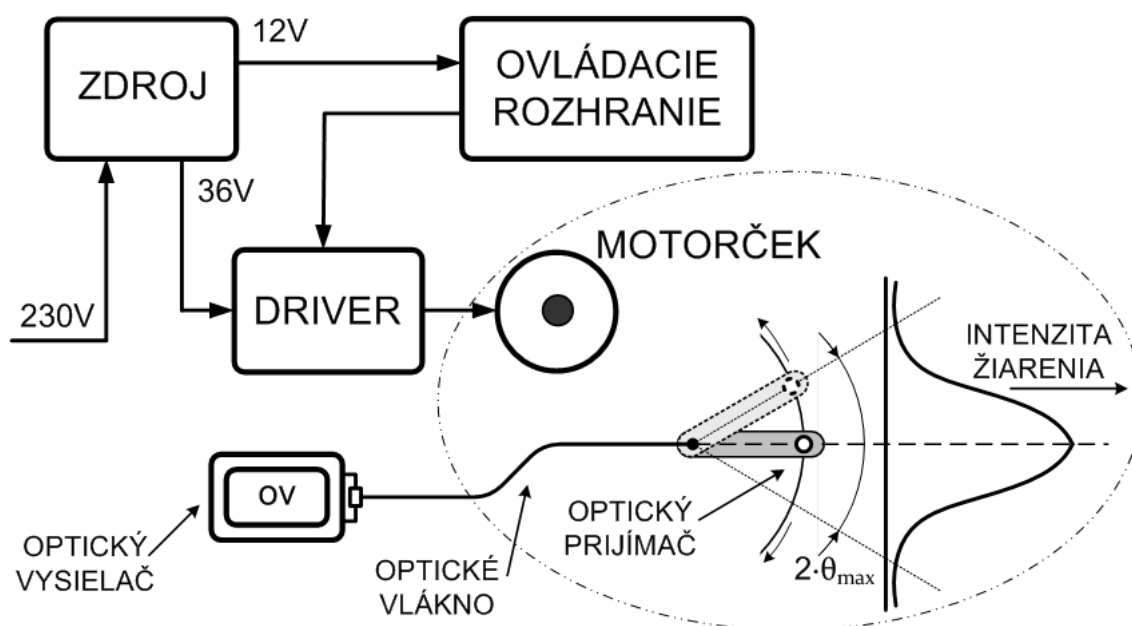


Obr. 14: Spektrálna charakteristika LED [1]

6 Návrh zariadenia pre meranie NA optických vlákien

Celkový návrh zariadenia pre meranie NA optických vlákien vychádza z blokovej schémy, ktorá je na obrázku 15. Hlavnou časťou je práve krokový motorček, na ktorom je upevnená meracia časť NA. A to nasledovným spôsobom. Na otočnej časti krokového motorčeka (rotora) je upevnené rameno. Na tomto ramene je upevnený optický prijímač (fotodetektor), ktorý meria veľkosť intenzity žiarenia daného meraného optického vlákna. Optické vlákno (merané) je pevné upevnené nad osou rotora krokového motorčeka, čiže výstup optického vlákna. Vstup meraného optického vlákna je pripojený k zdroju žiarenia (LED diódy alebo LASER diódy).

Krokový motorček je ovládaný driverom krokového motorčeka a driver je ovládaný ovládacím rozhraním driveru. Či driver krokového motorčeka, či ovládacie rozhranie driveru je napájané požadovaným napätím, ktoré dodáva zdroj napájania. Zdroj napájania je pripojený k sieťovému napätiu, čiže 230V.



Obr. 15: Bloková schéma zariadenia na meranie NA

6.1 Realizácia zariadenia pre meranie NA optických vlákien.

Daná realizácia zariadenia pre meranie NA optických vlákien vychádza z blokovej schémy na obrázku 15. Celkové zariadenie pozostáva zo štyroch častí (blokov). Dve tretiny zariadenia sa skladá z hotových súčiastok, ktoré boli objednané. Posledná tretina sú práve mnou navrhnuté časti a celkové skompletizovanie zariadenia pre meranie NA optických vlákien. Následné prejdem k popisom k jednotlivým použitým častiam pri realizácii zariadenia na meranie NA.

6.1.1 Krokový motorček 57HS04

Použil som krokový motorček od firmy Leadshine Technology, model 57HS04. Je to dvojfázový krokový motorček 1,3Nm, ktorý obsahuje osem žil. Základný krok je $1,8^\circ$. Pripojenie k driveru krokového motorčeka som zvolil sériové, pretože toto zapojenie vyžaduje najmenší prúd. Datasheet krokového motorčeka je možné nájsť v prílohe na CD.

6.1.2 Driver krokového motorčeka M415B

Ovláda chod motorčeka a určuje veľkosť kroku daného posuvu. Veľkosť kroku sa určuje vhodnou kombináciou zapnutia a vypnutia troch mikro-vypínačov. Používajú sa mikro-vypínače SW4, SW5, SW6. Dané kombinácie je možné vidieť v tabuľke 4. Najväčší možný krok v stupňoch je $1,8^\circ$ (odpovedá kombinácií, pri ktorej sú všetky mikro-vypínače v polohe ON). Táto kombinácia odpovedá 200 krokov na otáčku. Pri najmenšom možnom kroku $0,028125^\circ$ je počet krokov na otáčku až 12800. Pri meraní NA som používal najviac krok o $0,45^\circ$, čo odpovedá 800 krokov na otáčku. Pri presnejšom meraní som siahol po kroku $0,225^\circ$.

Driver obsahuje aj tri mikro-vypínače SW1, SW2, SW3. Pomocou nich sa nastavuje veľkosť prúdu pre daný krokový motorček (teda vhodnou kombináciou). Pri meraní som nechal všetky tri mikro-vypínače v polohe OFF, tým som docielil, že krokový motorček dostaval najväčší možný prúd.

Driver krokového motorčeka je ovládaný pomocou dvoch vstupov, a to PUL (signál impulzu) a DIR (signál smeru). K obidvom vstupom je pripojený odpor o hodnote 1k, pretože vstup OPTO je pripojený k napätiu 12V. Klasický by mal byť ku 5V. Celkové napájanie driveru je 36 V. Datasheet, ale aj zapojenie daného driveru krokového motorčeka je možné nájsť v prílohe na CD.

UHOL	SW4	SW5	SW6
1,8°	ON	ON	ON
0,9°	OFF	ON	ON
0,45°	ON	OFF	ON
0,225°	OFF	OFF	OM
0,1125°	ON	ON	OFF
0,05625°	OFF	ON	OFF
0,028125°	ON	OFF	OFF

Tab. 4: Tabuľka z kombináciami na zvolenie uhlu daného kroku v stupňoch



Obr. 16: Driver krokového motorčeka M415B

6.1.3 Ovládacie rozhranie driveru krokového motorčeka

Ovláda driver krokového motorčeka, čiže nahrádza činnosť počítača pri meraní NA optických vlákien. Pozostáva z dvoch plošných spojov, ktoré sú vložené do plastovej krabičky (obrázok 17). Plošné spoje sú spojené pomocou kovových distančných stĺpikov.

Prvý spodný plošný spoj je vývojová doska AXEboard-28. Táto vývojová doska je určená pre ľahšiu realizáciu pokusných, ale aj definitívnych zapojení s mikrokontrolérom PICAXE-28X1. Napájanie dosky je jednosmerné v rozmeru od 8 až 15V. Použil som napájanie 12V. Vývojová doska obsahuje 8 digitálnych vstupov a výstupov od číslovania 0 až 7. Obsahuje aj 4 analógové vstupy (nevyužité), ale aj programovací vstup na nahratie vytvoreného programu..

Použité digitálne vstupy (číslovanie 0 až 7):

- vstup 1 - pripojené ľavé čierne tlačidlo,
- vstup 2 - pripojené pravé čierne tlačidlo,
- vstup 3 - pripojené zelené tlačidlo,
- vstup 5 - pripojené ľavé modré tlačidlo,
- vstup 6 - pripojené pravé modré tlačidlo.

Použité digitálne výstupy (číslovanie 0 až 7):

- výstup 0 - ovláda červenú LED diódu,
- výstup 2 - vysiela signál CLOCK pre radič LED displeja,
- výstup 3 - vysiela signál DATA pre radič LED displeja,
- výstup 6 - vysiela signál DIR pre driver krokového motorčeka,
- výstup 7 - vysiela signál PUL pre driver krokového motorčeka.

Ako bolo už napísané vývojová doska obsahuje mikrokontrolér (teda ďalej mikroprocesor) PICAXE-28X1. Tento mikroprocesor ovláda celú riadiacu činnosť ovládacieho rozhrania driveru. Bol mnou naprogramovaný, a to pomocou softwaru PICAXE Programming Editor. Tento program je voľne dostupný. Je veľmi jednoduchý a je určený pre rýchlu realizáciu programov, buď pomocou vývojových diagramov alebo písaním príkazov. Slúži aj ako simulácia, používa sa aj na nahratie hotového programu do mikroprocesora pomocou PICAXE programovacieho káblu.

Druhý plošný spoj, ktorý je vidieť na obrázku 17, obsahuje ovládacie prvky na ovládanie zariadenia na meranie NA vlákien. Na plošnom spoji sa nachádza aj dvojmiestny LED displej s radičom a LED dióda. LED dióda signalizuje posun krokového motorčeka, pauzu pri meraní a resetovanie nastavených hodnôt. Radič je umiestnený z druhej strany plošného spoja, podobne

aj obojstranné kolíky slúžiace na pripojenie konektorov. Čiže všetky vstupy a tri výstupy prvého plošného spoja sú prepojené s druhým plošným spojom pomocou konektorov. Do druhého plošného spoja je privedené napätie 12V na napájanie radiča LED a samotného LED displeja.



Obr. 17: Ovládacie rozhranie driveru bez vrchného a bočného krytu

Ovládacie rozhranie driveru má s prednej časti 15-pinový CANON konektor. Na tento konektor sú pripojené tri páčkové vypínače, dva výstupy s vývojovej dosky (signály PUL a DIR) a napájanie 12V na činnosť ovládacieho rozhrania driveru. Páčkové vypínače sú cez kábel pripojené na driver motorčeka a nastavujú vhodnú kombináciu vypínačov SW4, SW5, SW6.

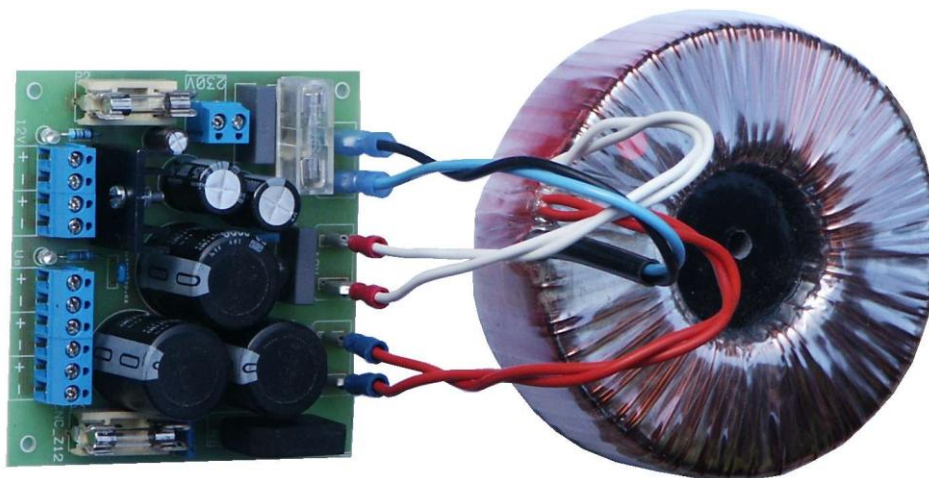
TLAČIDLA	FUNKCIA
čierne - L	kroky (od 20 do 90 - odstup po 10)
čierne - P	čas [s] (od 5 do 15 - odstup po 5)
zelene	štart, pauza, reset
modré - L	posun vľavo
modré - P	posun vpravo
páčkové vypínače	veľkosť daného kroku

Tab. 5: Prehľad daných funkcií jednotlivých tlačidiel

V prílohách na CD je možné nájsť informácie o vývojovej doske AXEboard-28, o mikrokontroléri PICAXE-28X1 (celkovo o PICAXE), o dvojmiestnom LED displeji a radiču LED displeja. Ďalej programátorské príručky a manuály (v češtine alebo angličtine), postup na vytvorenie programovacieho káblu, software PICAXE Programming Editor a na koniec aj naprogramovaný program na ovládanie driveru.

6.1.4 Zdroj napájania

Napájací zdroj poskytuje dve výstupne navzájom galvanicky oddelené napätia. Prvé nestabilizované napätie 36V/4A pre napájanie driveru krokového motorčeka a druhé stabilizované 12V/1A pre napájanie ovládacieho rozhrania driveru a aj vstupu OPTO u driveru krokového motorčeka. Zdroj sa skladá z toroidného transformátoru a modulu zdroja. Na doske modulu sú umiestnené svorkovnice pre pripojenie vstupného napätia 230V, 3-krát svorkovnice pre napätie 36V a 2-krát svorkovnice pre napätie 12V. Na modulu sú umiestnené aj 3 poistky (sieťová a dve pre výstupné napätia). Výstupné napätia sú signalizované LED diódami.



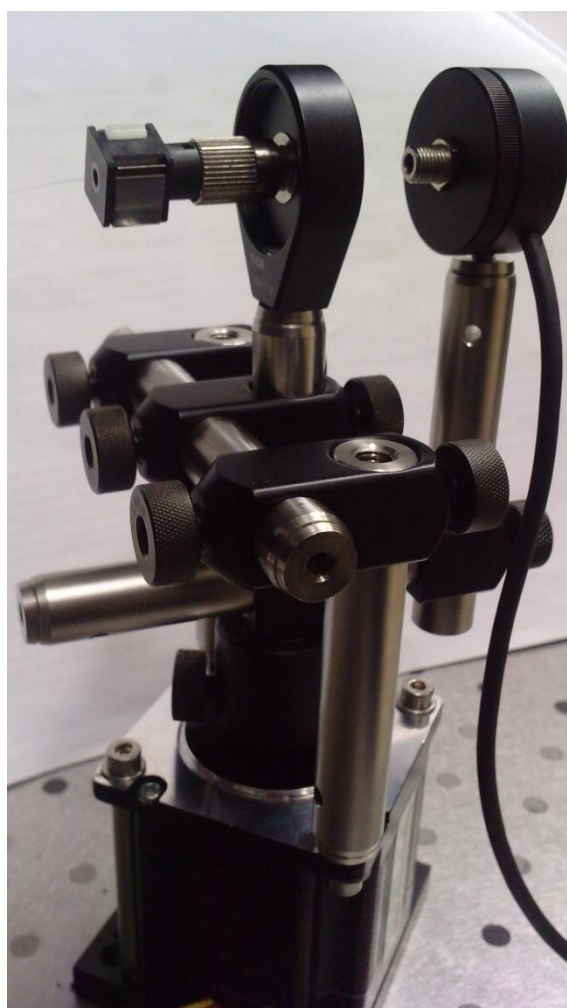
Obr. 18: Zdroj napájania s dvoma výstupnými napätiami

6.1.5 Zhotovené zariadenie na meranie NA optický vlákien

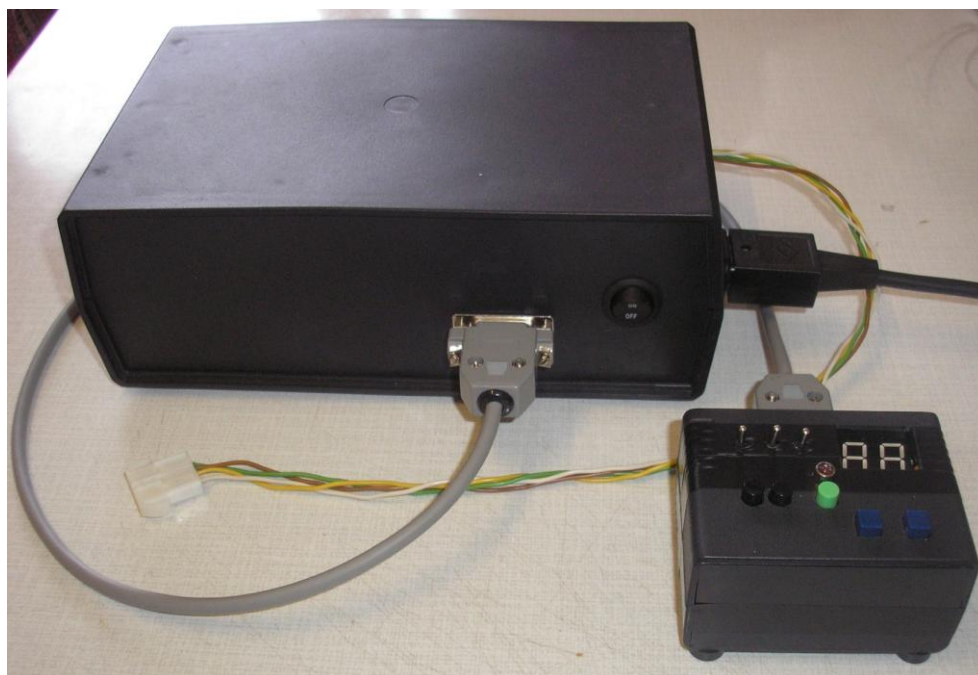
Ako je možné vidieť na obrázku 21, ovládacie rozhranie driveru je pripojené pomocou 15 žilového káblu a konektorov CANON ku ostatným častiam zariadenia. Tým mám namysli zdroj napájania a driver krokového motorčeka. Tieto časti sú umiestnené v čiernej plastovej krabici. Toroid zdroja napätia je oddelený plechovou doskou od ostatných častiach, ktoré sa nachádzajú

v krabičke. Krabička obsahuje z prednej strany CANON konektor a sieťový vypínač celého zariadenia. Na pravej bočnej strane je sieťový napájací konektor (vidlica) na pripojenie sieťového napätia 230V. Z tej istej strany vychádza kábel (4 žily), ktorý je určený na pripojenie krokového motorčeka.

Celá meracia časť z krokovým motorčekom je na obrázku 19 a 20. Meracia časť, ktorá je upevnená na motorčeku sa skladá zo súčiastok od firmy Thorlabs. Tato firma je priekupník v oblasti optiky. Použitý fotodetektor je kremíkový, dokáže merať pri vlnových dĺžkach od 200nm do 1100 nm. Na fotodetektore je umiestnený nadstavec, aby sa znížila meracia časť a tým sa docieli presnejšie meranie. Je umiestnený na ramene, ktoré je pripevnené na otočnej časti motora (rotora). Merané optické vlákna používajú FC konektory. Výstupná časť optické vlákno je pevne upevnená nad osou rotora.



Obr. 19 a 20: Meracia časť NA s krokovým motorčekom



Obr. 21: Celkové navrhnuté zariadenie bez motorčeka

6.2 Postup merania NA pomocou ovládacieho rozhrania driveru

Celkový postup pozostáva z niekoľkých bodov:

- Modré štvorcové tlačidlá slúžia na posun o jednu pozíciu, buď do pravá alebo do ľavá. Týmto posuvmi sa docieli nájdenie nulovej pozície, v ktorej je najväčšia intenzita žiarenia.
- Pomocou troch páčkových vypínačov sa zvolí vhodná kombinácia na nastavenie požadovanej veľkosti kroku v stupňoch.
- Ľavým guľatým čiernym tlačidlom sa nastaví počet všetkých krokov pri meraní NA. Rozsah krokov je od 20 do 90, s odstupom po 10-tich krokov. Čiže pri nastavení 60-tich krokov, krokový motorček vykoná 30 krokov do pravá a 30 krokov do ľavá od nulte pozície.
- Pravým guľatým čiernym tlačidlom sa nastaví čas v sekundách medzi jednotlivými krokmi. Rozsah je od 5 do 15 sekúnd, s odstupom po 5-tich sekundách.

- Následné guľaté zelené tlačidlo spusti dané meranie NA meraného optického vlákna. V prípade potreby stlačenie tlačidla počas merania vykoná pauzu. Po opätovnom stlačení bude meranie pokračovať. Pri dlhšom stlačení približne 2 až 3 sekundy dôjde ku resetovaniu všetkých predtým nastavených hodnôt. Displej sa vynuluje a krokový motorček zastaví na danej pozícii.

Dvojmiestny LED displej zobrazuje číslo daného meraného kroku počas meraní NA. Zobrazoval nám aj zvolené hodnoty počtu krokov a času medzi jednotlivými krokmi. LED dióda bliká počas posuvu motorčeka pri meraní, pri pauze stále svieti a pri resetovaní merania dva krát zabliká.

Počas merania je možné meniť veľkosť nastaveného kroku. Po vyvolaní pauzy merania sa nastaví požadovaný uhol kroku, následne sa opäť spustí meranie. Pri návrate ramena s optickým prijímačom ku nulovej pozícii sa zastaví meranie v tom kroku, kde bola predtým uskutočnená zmena kroku. Nastaví sa teda veľkosť kroku, ktorá bola pred zmenou a stlačením zeleného tlačidla sa opätovne spusti meranie. Tato akcia sa môže vykonať aj v druhom smere. Zmena veľkosti kroku počas merania sa môže uskutočniť viac krát. Nesmie sa zabudnúť na to, že daná zmena kroku sa nevyvolá okamžite, ale až po prvom kroku.

6.3 Cenová kalkulácia použitých súčiastok

a) Krabíčka so zdrojom napájania a s driverom krokového motorčeka

Názov	Počet kusov	Cena - Cz
driver krokového motorčeka M415B	1	1250
napájací zdroj PS 150/36V	1	1000
krabíčka U-KP13	1	102
spínač 1x3A 250V	1	14
sieťová vidlica	1	23
1K, odpor metal 0,6W	2	2
konektor CANON zásuvka 15-pin	1	6
distančný stĺpik skrutka - matica 5mm	2	5
distančný stĺpik matica - matica 40mm	2	11
polkulata hlava M3x10mm	10	10
červené lanko 0,75mm ²	1m	4

čierne lanko 0,75mm ²	1m	4
kábel 4×0,5mm ² , 6A	2m	54
fastony na kábel s krytom, zásuvka	4	8
konektor zo zámkom RM 4,5 na kábel, zásuvka	1	1,5
káblové dutinky pre kábel 0,5 mm ² , dĺžka 8mm	100	35
Celková cena		<u>2529,5 CZ</u>

b) Ovládacie rozhranie

Názov	Počet kusov	Cena - Cz
vývojová doska pre procesor PICAXE-28X1	1	420
PICAXE-28X1	1	340
programovací kábel	1	65
plošný spoj 77x57 mm (vrchný)	1	50
2-polový páčkový vypínač	3	42
tlačidlo bez aretácie do DPS	5	32,5
hmatník na tlačidlo	5	15
pätica pre IO 20 PIN	1	2
LED 3MM RED 200CD	1	1
reflektor k LED dióde 3MM	1	2
driver LED displeja M5482B7	1	125
dvojmiestny LED displej 14,2 mm, 635 nm	1	20
10K, odpor metal 0,6W, 1%	5	5
1K, odpor metal 0,6W, 1%	5	5
91K, odpor metal 0,4W, 1%	1	1
510R, odpor metal 0,6W, 1%	1	1
1nF, keramický kondenzátor	1	1,5
obojstranné kolíky do DPS 90 st. - jednorade 20-pin	1	4
konektory so zámkom do DPS 90 st. - vidlice 2-pin	3	3
konektor 3-pin, pre obojstranné kolíky	11	11
náhradný pin pre konektor pre obojstranné kolíky	33	16,5
konektor so zámkom, zásuvka, 2-pin	8	4
náhradný pin pre konektor zo zámkom	16	8

kábel 8x0.14 - mäkký	1m	28
krabička U-KM48BN	1	37
konektor CANON zásuvka 15-pin	1	6
distančný stĺpik skrutka - matica 5mm	2	5
polkulata hlava M3x10mm	8	8
distančný stĺpik matica - matica 25mm	4	16
čierna izolačná páska	1	8
Celková cena		<u>1282,5 CZ</u>

c) Sieťový kábel

Názov	Počet kusov	Cena - Cz
prístrojový kábel (voľný koniec Flexo-3x0,75-3m)	1	70
sieťová zásuvka na kábel	1	20
Celková cena		<u>90 CZ</u>

d) Prepojovací kábel

Názov	Počet kusov	Cena - Cz
konektor CANON vidlica 15-pin	2	12
kryt na CANON konektor 15-pin	2	20
kábel Cu 15+1x(7x0,12)	1m	12
Celková cena		<u>44 CZ</u>

e) Krokový motorček

Názov	Počet kusov	Cena - Cz
krokový motorček 57HS09	1	890
konektor zo zámkom RM 4,5 na kábel, vidlica	1	1,5
náhradný pin pre konektor zo zámkom RM 4,5	4	4
Celková cena		<u>895,5 CZ</u>

THORLABS súčiastky:

Názov	Počet kusov	Cena - €
TR75/M - Ø1/2" x 75 mm Post, Metric	3	14,7
TR30/M - Ø1/2" x 30 mm Post, Metric	1	4,3
TR50/M - Ø1/2" x 50 mm Post, Metric	1	4,7
TR100/M - Ø1/2" x 100 mm Post, Metric	1	5,3
RA90 - Right Angle Post Clamp	3	26,7
RA180 - 1/4"-20 Stud and Fixed 90 Degree Clamp	2	17,8
PH1/M - Post Holder with Spring Loaded Hex, 25,4 mm	1	6,3
SM1FC - SM1 (1.035"-40) to FC Fiber Adapter Plate	1	23,1
LMR1/M - Metric, Lens Mount for Ø1" Optics	1	14
MS2R/M - Mini Series Mounting Posts, Ø6 mm, 50 mm	2	11,2

Celková cena**128,1 €****Celková cena v CZ, kurz 4.5.2010 = 25,710****3293,5 CZ**

Hlavné bloky súčiastok	Cena - Cz
Krabička so zdrojom a s driverom	2529,5
Ovládacie rozhranie	1282,5
Sieťový kábel	90
Prepojovací kábel	44
Krokový motorček	895,5 + 3293,5 = 4189
Celková cena + Thorlabs	8135

Tab. 6: Celková cena zariadenia na meranie NA optických vlákien

7 Meranie NA vlákien pomocou navrhnutého zariadenia

Meranie sa uskutočnilo v školskom optickom laboratóriu. Medzi zmerané optické vlákna patrili najviac používané v oblasti optiky, ale aj tri špeciálne laboratórne vlákna. Každé vlákno malo rovnakú dĺžku (1,5 m). Pred meraním boli konce vlákien vložené do FC konektorov a dôkladne vyčistené. Dôkladnosť vyčistenia bolo skontrolované pomocou ručného mikroskopu. Použité boli dva zdroje žiarenia a to v podobe LED a laserovej diódy. Meranie sa uskutočnilo pri vlnovej dĺžke 850 nm, pretože použitý fotodetektor bol vyrobený z kremíka a dokázal merať v rozsahu 200 až 1100 nm. Všetky merania sa uskutočňovali 3-krát po sebe a následné sa tieto hodnoty spriemerovali. Dané namerané hodnoty sú v prílohe 1 a vyžarovacie charakteristiky v prílohe 2. Použitý krok posuvu bol 0,45°.

7.1 Zdroj žiarenia v podobe laserovej diódy

Použitý zdroj žiarenia v podobe laserovej diódy vyžaruje užší zväzok a je omnoho výkonný ako zdroj v podobe LED dióda. Zmerané optické vlákna z konfiguráciou so zdrojom žiarenia laserovej diódy boli.

7.1.1 Jednovidové optické vlákno (9/125 μm)

Ako bolo už napísané všetky merania sa uskutočňovali pri vlnovej dĺžke 850 nm (použitý fotodetektor nepracoval nad 1100 nm). Jednovidové optické vlákna pracujú s vlnovými dĺžkami 1310 a 1550 nm. Keďže meranie sa neuskutočnilo pri týchto vlnových dĺžkach a podobne aj výrobca vlákna udával NA pre tieto dĺžky, tak došlo ku skresleným nameraným hodnôt. Namerané hodnoty sú v prílohe 1 v tabuľke 1 a priebeh vyžarovacej charakteristiky v prílohe 2 v grafu 1. Vzdialenú oblasť, teda oblasť medzi meraným vláknom a fotodetektorom, bola vypočítaná zo vzorca (19) a následné zvolená, čiže 2 cm.

Poklesu o 13 dB od maximálnej hodnoty (teda 5 % z P_{\max}) odpovedal uhol od nulovej pozície $\theta_{\max} = 7,2^\circ$. Po dosadení hodnôt do vzorca:

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_{\max} = 1,0003 \cdot \sin 7,2 = \mathbf{0,125} \quad (20)$$

Jednovidové optické vlákna majú numerickú apertúru v rozsahu od 0,08 do 0,1.

7.1.2 Špeciálne optické vlákna SG1005,SG1006,SG1017 (cca 40/125 μm)

Tieto špeciálne optické vlákna sú kvazo-jednovidové optické vlákna. Kvazo-jednovidové optické vlákna pracujú za hranicami jednovidovosti, respektíve podporujú šírenie viac vidov, typicky 2 až 6. Príčinou je špeciálny atypický profil vlákien, ktorý je výsledkom výskumu na Katedre telekomunikácii VŠB-TU Ostrave v spolupráci s ÚFE AVČR. Kvazo-jednovidové vlákna sa dajú využiť ako prenosové média pre optickú komunikáciu a zároveň i ako optické senzory. V tomto prípade sa jedná o optovláknové senzory založené na prerozdeľovaní optického výkonu medzi niekoľkými vidmi. Myšlienkou pri vývoji kvazo-jednovidových vlákien bolo ich použitie v prístupových, pasívne optických sieťach. Tu by tieto nové typy optických vlákien prevzali funkciu konvenčných jednovidových vlákien ako prenosové média a najviac by umožňovali poskytovateľovi prístupovej siete mať prehľad o stave z hľadiska pôsobenia vnútorných vplyvov, ako je napríklad teplota alebo mechanické napätie. [14]

Namerané hodnoty sú v prílohe 1 pre optické vlákno SG1005 v tabuľke 2, SG1006 v tabuľke 3, SG1017 v tabuľke 4. Jednotlivé priebehy vyžarovacích charakteristík sú prílohe 2 pre optické vlákno SG1005 graf 2, SG1006 graf 3, SG1017 graf 4. Vzdialenú oblasť bola vypočítaná zo vzorca (19) a následné zvolená, čiže 2 cm.

Pre špeciálne optické vlákno SG1005 bol pokles o 13 dB, teda 5 % z maximálnej hodnoty pri uhlu od nulovej pozícii $\theta_{\max} = 12,15^\circ$. Po dosadení hodnôt do vzorca:

$$NA = n_0 \cdot \sin\theta_{\max} = 1,0003 \cdot \sin 12,15 = \mathbf{0,211} \quad (21)$$

Pre špeciálne optické vlákna SG1006 a SG1017 bol pokles o 13 dB, teda 5 % z maximálnej hodnoty pri uhlu od nulovej pozícii $\theta_{\max} = 10,8^\circ$. Po dosadení hodnôt do vzorca:

$$NA = n_0 \cdot \sin\theta_{\max} = 1,0003 \cdot \sin 10,8 = \mathbf{0,187} \quad (22)$$

Výrobca týchto vlákien neudáva NA, keďže optické vlákna sú určené na laboratórne výskumy (sú v štádiu výskumu). Z predpokladov je možné usúdiť, že hodnoty numerických apertúr pre tieto špeciálne optické vlákna by sa malý pohybovať v rozsahu pred mnohovidovým vláknom 50/125 μm . Priemery jadier vlákien sú okolo 40 μm a taktiež vlákna dokážu pracovať z vlnovými dĺžkami pre jednovidové či mnohovidové vlákna.

7.1.3 Mnohovidové optické vlákno (62,5/125 μm)

V tomto meraní som použil mnohovidové optické vlákno s laserovým zdrojom pre overenie, že numerická apertúra je obmedzená nie len s geometrickými rozmermi vlákna, ale aj veľkosťou vidovej plochy a rozložením vidov svetelného zdroja (užší zväzok = NA menšia ako udáva výrobca vlákna). Namerané hodnoty sú v prílohe 1 v tabuľke 5 a priebeh vyžarovacej charakteristiky v prílohe 2 v grafu 5. Vzdialenú oblasť bola vypočítaná zo vzorca (19) a následne zvolená, čiže 4,6 cm.

Poklesu o 13 dB od maximálnej hodnoty (teda 5 % z P_{\max}) odpovedal uhol od nulovej pozície $\theta_{\max} = 9,0^\circ$. Po dosadení hodnôt do vzorca:

$$NA = n_0 \cdot \sin\theta_{\max} = 1,0003 \cdot \sin 9,0 = \mathbf{0,156} \quad (23)$$

Výrobca optického vlákna udáva hodnotu NA 0,271.

7.2 Zdroj žiarenia v podobe LED diódy

Použitý zdroj žiarenia v podobe LED diódy vyžaruje širší zväzok ako laserová dióda. Preto je tento zdroj vhodný práve pre mnohovidové optické vlákna. Zmerané optické vlákna z konfiguráciou so zdrojom žiarenia LED diódy boli:

7.2.1 Mnohovidové optické vlákno (50/125 μm)

Namerané hodnoty sú v prílohe 1 v tabuľke 6 a priebeh vyžarovacej charakteristiky v prílohe 2 v grafu 6. Vzdialenú oblasť bola vypočítaná zo vzorca (19) a následne som zvolil vzdialenosť 3 cm.

Poklesu o 13 dB od maximálnej hodnoty (teda 5 % z P_{\max}) odpovedal uhol od nulovej pozície $\theta_{\max} = 12,6^\circ$. Po dosadení hodnôt do vzorca:

$$NA = n_0 \cdot \sin\theta_{\max} = 1,0003 \cdot \sin 12,6 = \mathbf{0,218} \quad (24)$$

Výrobca optického vlákna udáva hodnotu NA 0,203

7.2.2 Mnohovidové optické vlákno (62,5/125 μm)

Namerané hodnoty sú v prílohe 1 v tabuľke 7 a priebeh vyžarovacej charakteristiky v prílohe 2 v grafu 7. Vzdialenú oblasť bola vypočítaná zo vzorca (19) a následne som zvolil vzdialenosť 4,6 cm.

Poklesu o 13 dB od maximálnej hodnoty (teda 5 % z P_{max}) odpovedal uhol od nulovej pozície $\theta_{\text{max}} = 16,2^\circ$. Po dosadení hodnôt do vzorca:

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_{\text{max}} = 1,0003 \cdot \sin 16,2 = \mathbf{0,279} \quad (25)$$

Výrobca optického vlákna udáva hodnotu NA 0,271.

7.3 Vyhodnotenie merania NA jednotlivých optických vlákien

Keďže každé optické vlákno sa meralo trikrát a hodnoty boli s priemerované, tak by sa dalo povedať, že namerané hodnoty sú dôveryhodné. Pri meraní mnohovidových optických vlákien nedošlo k žiadnym veľkým problémom. Zmerané numerické apertúry sa veľmi blížili k hodnotám, ktoré udával výrobca vlákien. Pri použití zberača žiarenia v podobe laserovej diódy pri mnohovidových vlákien dochádzalo ako bolo už napísané k zmenšeniu numerickej apertúry. To bolo spôsobené tým, že použitý zdroj vyžaroval užší zväzok žiarenia. I keď mnohovidové vlákno 50/125 μm sa podarilo zmerať laserovým zdrojom, ale pri zvolený väčšej vzdialenej oblasti bola NA omnoho menšia. Pre mnohovidové vlákno 62,5/125 μm už NA bola veľmi malá pri vypočítanej vzdialenej oblasti.

Čo sa týka jednoovidového optického vlákna bola NA trochu väčšia ako udával výrobca. To mohlo byť spôsobené tým, že nadstavec na fotodetektoru, ktorý zmenšoval meraciu časť žiarenia nemal dostatočné mali otvor. Špeciálne optické vlákna nebolo možné ako skontrolovať, keďže sú to vlákna určené pre laboratórne účely. Zmerané numerické apertúry boli menšie, poprípade rovnaké ako ma mnohovidové vlákno 50/125 μm . Z toho vyplýva, keďže špeciálne vlákna majú priemer jadrá okolo 40 μm , že hodnoty by odpovedali skutočnosti.

Takže meranie optických vlákien dopadlo celkom úspešne a namerané hodnoty sú prijateľné k hodnotám, ktoré udávajú výrobcovia daných optických vlákien.

8 Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnúť zariadenie pre meranie numerickej apertúry optických vlákien. Už samotný návrh bol v podstate zložitý. Existuje viacero spôsobov ako sa dá NA merať. Nakoniec bol vybraný spôsob, kde na krokovom motorčeku je upevnená meracia časť zariadenia. Pred uskutočneným realizácie výroby zariadenia bolo treba daný návrh odskúšať. Návrh meracej časti bol skonštruovaný pomocou súčiastok od firmy Thorlabs. Dané posuvy sa uskutočňovali ručným otáčaním. Po niekoľkých skúšobných meraniach bol záver uspokojivý.

Nasledoval výber vhodných súčiastok pre celkové zariadenie. Hlavná časť zariadenia (krokový motorček, driver krokového motorčeka, zdroj napájania) bola objednaná z obchodu, ktorá predáva široký sortiment pre stavbu CNC strojov. Keďže pri meraní pracujem s veľmi malými krokmi posuvu, tak neodmysliteľnou súčasťou zariadenia musel byť driver krokového motorčeka. Samotný krokový motorček pracujem s krokom o veľkosti $1,8^\circ$. A to pre meranie NA je nedostačujúce. Ďalším krokom pre dokončenie zariadenia bolo samotné ovládanie výsledného zariadenia. Nakoniec prešiel spôsob, že ovládanie bude realizované pomocou vopred naprogramovaným mikroprocesorom. Tu sa podobne ako pri CNC strojov využila ľahšia cesta vo forme mikroprocesora z rodiny PICAXE. Tento mikroprocesor je vlastné mikrokontrolér, ktorý ma už vopred naprogramované základné príkazy. Používajú sa hlavné pri stavbe amatérskych robotov. Čo sa týka vlastnej výroby bolo treba vyrobiť plošný spoj z ovládacími prvkami. Plošný spoj obsahuje aj dvojmiestny LED displej s radičom. Radič sa musel tiež naprogramovať. Po dokončení sa plošné spoje ovládacieho rozhrania umiestnili do krabičky a podobné aj ostatné súčiastky zariadenia do druhej väčšej krabice. Medzi sebou sa spojili káblom. Samotná realizácia bola ukončená. Pri meraní NA na dostupných optických vláknach sa postupne odstraňovali chyby, aby meranie bolo čo najviac presne. Hotové zariadenie pracovalo tak ako bolo pre svoj účel skonštruovaný.

V budúcnosti, keďže s prácou sa bude pokračovať v ďalších rokoch sa dopracuje ovládanie pomocou počítača. Bude naprogramovaný program, ktorý bude slúžiť na ovládanie zariadenia. Celková činnosť zariadenia bude rozšírená do viacerých oblastí, nie len na meranie NA optických vlákien.

Použitá literatúra

- [1] MIHALKA, Pavel. *Optoelektronika*. 1. vydanie. Bratislava : Alfa, 1981. 464 s.
- [2] BAILEY, David ; WRINGHT, Edwin. *Practical Fiber Optics*. 1. vydanie. Great Britain : IDC Technologies, 2003. 267 s. ISBN 0750658002.
- [3] DADO, Milan, et al. *Kapitoly z optiky pre technikov*. 1. Vydanie. Žilina : EDIS - vydavateľstvo ŽU, 1998. 348 s. ISBN 80-7100-390-5.
- [4] VAŠINEK, V.: *Materiály pro výuku předmětů Optoelektronika I, II a III.* (2007-2008).
- [5] Ing. J. Fischer, CSc.: *Optoelektronické senzory a videometrie*, ČVUT Praha 2002, ISBN 80 – 01 – 02525 – X.
- [6] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika*. Brno : Vysoké učenie technické v Brne, 2008. 125s.
- [7] *Comtel.cz* [online]. 2009 [cit. 2010-05-05]. Meranie numerickej apertúry optických vlákien. Dostupné z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=3185>>.
- [8] *Comtel.cz* [online]. 2009 [cit. 2010-05-05]. Optické prenosové prostriedky a systémy WDM. Dostupné z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=2198>>.
- [9] SALEH, Bahaa E. A; TEICH, Malvin C. *Základy fotoniky* . 3. zväzok. Praha : Matfyzpress, 1995. 778 s. ISBN 80-85863-05-7.
- [10] CUPÁK, Zdeněk. *Návrh snímací kamery pro vyhodnocování intenzitních změn na výstupu optických vláken*. [s.l.], 2006. 56 s. Diplomová práce. VŠB - TU Ostrava.
- [11] PŘEHNIL, Michal. *Návrh projekční soustavy pro snímání specklových obrazů na čele vláken 2006*. [s.l.], 2006. 52 s. Diplomová práce. VŠB - TU Ostrava.
- [12] DECUSATIS, Casimer; SHER DECUSATIS, Carolyn. *FIBER OPTIC ESSENTIALS*. [s.l.] : Elsevier Inc., 2006. 271 s. ISBN 978-0-12-208431-7.
- [13] ŠIŠKA, Petr. *Studium a modelování módové vazby v optických vláknech v blízkosti normalizované frekvence*. Ostrava, 2008. 90 s. Dizertační práce. VŠB - TU Ostrava.
- [14] KOUDELKA, Petr, et al. *Studium senzorických vlastností Kvazo-jednovidových optických vláken. Publikovanie výsledkov vedy a výskumu* [online]. 2010, č. 1, [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.fyzika.utc.sk/journal.html>>.

- [15] <URL: <http://www.hobbyrobot.cz/> >, Hobbyrobot.
- [16] <URL: <http://www.thorlabs.de/> >, Thorlabs.
- [17] <URL: <http://cncshop.cz/> >, CNC & automatizacie.
- [18] <URL: <http://www.gme.cz/> >, GM electronic maloobchod.

Zoznám príloh

- Príloha 1 - Tabuľky obsahujúce namerané hodnoty jednotlivých optických vlákien (už z priemerované hodnoty). Papierová forma.
- Príloha 2 - Vykreslené grafy z nameraných hodnôt vlákien v závislosti od veľkosti žiarenia a daného uhlu v stupňoch. Papierová forma.
- Príloha 3 - Datasheet krokového motorčeka 57HS09 v elektronickej forme na CD.
- Príloha 4 - Datasheet driveru krokového motorčeka M415B v elektronickej forma na CD.
- Príloha 5 - Datasheet vývojovej dosky AXEboard-28 v elektronickej forme na CD.
- Príloha 6 - PICAXE manuály pozostávajúce z troch častí v elektronickej forme na CD
- Príloha 7 - Programátorská príručka mikroprocesorov PICAXE (česky jazyk) v elektronickej forme na CD.
- Príloha 8 - Tvorba programovacieho káblu na dosky obsahujúce mikroprocesory PICAXE (český jazyk) v elektronickej forme na CD.
- Príloha 9 - Software PICAXE Programming Editor verzia 5.1.2 priložený na CD.
- Príloha 10 - Naprogramovaný program pre mikroprocesor PICAXE 28-X1 priložený na CD.
- Príloha 11 - Datasheet LED displeja v elektronickej forme na CD.
- Príloha 12 - Datasheet driveru LED displeja.
- Príloha 13 - Nákres vyrobeného plošného spoja na ktorom sa umiestnili ovládacie prvky v elektronickej forme na CD.

Príloha 1: Tabuľky nameraných hodnôt vlákien

číslo kroku	intenzita		uhol	číslo kroku	intenzita		uhol
	[dBm]	[nW]	[deg]		[dBm]	[nW]	[deg]
0	-2,24	597,04	0				
1	-2,33	584,79	0,45	26	-2,32	586,14	-0,45
2	-2,40	575,44	0,9	27	-2,39	576,77	-0,9
3	-2,76	529,66	1,35	28	-2,62	547,02	-1,35
4	-3,02	498,88	1,8	29	-2,85	518,80	-1,8
5	-3,26	472,06	2,25	30	-3,13	486,41	-2,25
6	-3,70	426,58	2,7	31	-3,56	440,55	-2,7
7	-4,16	383,71	3,15	32	-4,04	394,46	-3,15
8	-4,94	320,63	3,6	33	-4,75	334,97	-3,6
9	-5,88	258,23	4,05	34	-5,75	266,07	-4,05
10	-6,82	207,97	4,5	35	-6,67	215,28	-4,5
11	-7,69	170,22	4,95	36	-7,44	180,30	-4,95
12	-9,04	124,74	5,4	37	-8,84	130,62	-5,4
13	-10,57	87,70	5,85	38	-10,19	95,72	-5,85
14	-11,78	66,37	6,3	39	-11,47	71,29	-6,3
15	-13,15	48,42	6,75	40	-12,83	52,12	-6,75
16	-15,50	28,18	7,2	41	-15,02	31,48	-7,2
17	-18,06	15,63	7,65	42	-17,74	16,83	-7,65
18	-19,66	10,81	8,1	43	-18,92	12,82	-8,1
19	-21,20	7,59	8,55	44	-20,77	8,38	-8,55
20	-23,93	4,05	9	45	-23,11	4,89	-9
21	-26,41	2,29	9,45	46	-25,98	2,52	-9,45
22	-28,19	1,52	9,9	47	-27,87	1,63	-9,9
23	-30,87	0,82	10,35	48	-30,14	0,97	-10,35
24	-34,31	0,37	10,8	49	-33,51	0,45	-10,8
25	-37,36	0,18	11,25	50	-36,88	0,21	-11,25

Tab. 1: Jednovidové optické vlákno 9/125 μm - LASERový zdroj žiarenia

číslo kroku	intenzita		uhol	číslo kroku	intenzita		uhol
	[dBm]	[nW]	[deg]		[dBm]	[nW]	[deg]
0	-3,49	447,71	0				
1	-3,59	437,52	0,45	36	-3,62	434,51	-0,45
2	-3,66	430,53	0,9	37	-3,69	427,56	-0,9
3	-3,73	423,64	1,35	38	-3,73	423,64	-1,35
4	-3,98	399,94	1,8	39	-3,87	410,20	-1,8
5	-4,18	381,94	2,25	40	-4,07	391,74	-2,25
6	-4,22	378,44	2,7	41	-4,25	375,84	-2,7
7	-4,31	370,68	3,15	42	-4,42	361,41	-3,15
8	-4,57	349,14	3,6	43	-4,68	340,41	-3,6
9	-4,68	340,41	4,05	44	-4,95	319,89	-4,05
10	-4,76	334,20	4,5	45	-5,19	302,69	-4,5
11	-5,02	314,77	4,95	46	-5,33	293,09	-4,95
12	-5,69	269,77	5,4	47	-5,90	257,04	-5,4
13	-6,04	248,89	5,85	48	-6,38	230,14	-5,85
14	-6,36	231,21	6,3	49	-6,75	211,35	-6,3
15	-6,73	212,32	6,75	50	-7,03	198,15	-6,75
16	-7,39	182,39	7,2	51	-7,51	177,42	-7,2
17	-8,07	155,96	7,65	52	-8,12	154,17	-7,65
18	-8,42	143,88	8,1	53	-8,60	138,04	-8,1
19	-8,91	128,53	8,55	54	-9,09	123,31	-8,55
20	-9,02	125,31	9	55	-9,41	114,55	-9
21	-9,49	112,46	9,45	56	-10,13	97,05	-9,45
22	-10,30	93,33	9,9	57	-10,70	85,11	-9,9
23	-12,78	52,72	10,35	58	-12,01	62,95	-10,35
24	-13,36	46,13	10,8	59	-12,89	51,40	-10,8
25	-14,49	35,56	11,25	60	-13,95	40,27	-11,25
26	-15,43	28,64	11,7	61	-14,74	33,57	-11,7
27	-16,66	21,58	12,15	62	-16,17	24,15	-12,15
28	-17,73	16,87	12,6	63	-17,26	18,79	-12,6
29	-19,10	12,30	13,05	64	-18,83	13,09	-13,05
30	-20,23	9,48	13,5	65	-19,91	10,21	-13,5
31	-21,29	7,43	13,95	66	-20,76	8,39	-13,95
32	-22,80	5,25	14,4	67	-22,37	5,79	-14,4
33	-24,48	3,56	14,85	68	-23,77	4,20	-14,85
34	-25,34	2,92	15,3	69	-24,91	3,23	-15,3
35	-25,93	2,55	15,75	70	-25,56	2,78	-15,75

Tab. 2: Špeciálne optické vlákno SG1005 - LASERový zdroj žiarenia

číslo kroku	intenzita		uhol	číslo kroku	intenzita		uhol
	[dBm]	[nW]	[deg]		[dBm]	[nW]	[deg]
0	-3,08	492,04	0				
1	-3,09	490,91	0,45	36	-3,10	489,78	-0,45
2	-3,13	486,41	0,9	37	-3,15	484,17	-0,9
3	-3,22	476,43	1,35	38	-3,25	473,15	-1,35
4	-3,31	466,66	1,8	39	-3,39	458,14	-1,8
5	-3,49	447,71	2,25	40	-3,53	443,61	-2,25
6	-3,72	424,62	2,7	41	-3,68	428,55	-2,7
7	-3,92	405,51	3,15	42	-3,94	403,65	-3,15
8	-4,19	381,07	3,6	43	-4,30	371,54	-3,6
9	-4,51	354,00	4,05	44	-4,52	353,18	-4,05
10	-4,89	324,34	4,5	45	-4,83	328,85	-4,5
11	-5,17	304,09	4,95	46	-5,28	296,48	-4,95
12	-5,59	276,06	5,4	47	-5,81	262,42	-5,4
13	-6,03	249,46	5,85	48	-6,25	237,14	-5,85
14	-6,61	218,27	6,3	49	-6,68	214,78	-6,3
15	-7,15	192,75	6,75	50	-7,45	179,89	-6,75
16	-7,86	163,68	7,2	51	-8,38	145,21	-7,2
17	-8,67	135,83	7,65	52	-8,95	127,35	-7,65
18	-9,47	112,98	8,1	53	-9,59	109,90	-8,1
19	-10,20	95,50	8,55	54	-10,57	87,70	-8,55
20	-11,17	76,38	9	55	-11,68	67,92	-9
21	-12,24	59,70	9,45	56	-12,59	55,08	-9,45
22	-13,54	44,26	9,9	57	-13,51	44,57	-9,9
23	-14,59	34,75	10,35	58	-14,93	32,14	-10,35
24	-15,99	25,18	10,8	59	-16,66	21,58	-10,8
25	-17,45	17,99	11,25	60	-17,82	16,52	-11,25
26	-19,30	11,75	11,7	61	-19,00	12,59	-11,7
27	-20,64	8,63	12,15	62	-20,85	8,22	-12,15
28	-22,16	6,08	12,6	63	-22,84	5,20	-12,6
29	-23,98	4,00	13,05	64	-24,35	3,67	-13,05
30	-26,07	2,47	13,5	65	-25,88	2,58	-13,5
31	-27,88	1,63	13,95	66	-28,25	1,50	-13,95
32	-29,94	1,01	14,4	67	-30,79	0,83	-14,4
33	-31,74	0,67	14,85	68	-32,29	0,59	-14,85
34	-34,11	0,39	15,3	69	-33,79	0,42	-15,3
35	-35,76	0,27	15,75	70	-35,83	0,26	-15,75

Tab. 3: Špeciálne optické vlákno SG1006 - LASERový zdroj žiarenia

číslo kroku	intenzita		uhol	číslo kroku	intenzita		uhol
	[dBm]	[nW]	[deg]		[dBm]	[nW]	[deg]
0	-3,30	467,74	0				
1	-3,32	465,59	0,45	36	-3,35	462,38	-0,45
2	-3,36	461,32	0,9	37	-3,42	454,99	-0,9
3	-3,43	453,94	1,35	38	-3,54	442,59	-1,35
4	-3,58	438,53	1,8	39	-3,70	426,58	-1,8
5	-3,77	419,76	2,25	40	-3,85	412,10	-2,25
6	-3,83	414,00	2,7	41	-3,99	399,02	-2,7
7	-4,11	388,15	3,15	42	-4,31	370,68	-3,15
8	-4,44	359,75	3,6	43	-4,71	338,06	-3,6
9	-4,58	348,34	4,05	44	-4,99	316,96	-4,05
10	-4,95	319,89	4,5	45	-5,30	295,12	-4,5
11	-5,36	291,07	4,95	46	-5,80	263,03	-4,95
12	-5,97	252,93	5,4	47	-6,39	229,61	-5,4
13	-6,30	234,42	5,85	48	-6,85	206,54	-5,85
14	-6,89	204,64	6,3	49	-7,32	185,35	-6,3
15	-7,85	164,06	6,75	50	-8,12	154,17	-6,75
16	-8,61	137,72	7,2	51	-9,07	123,88	-7,2
17	-9,14	121,90	7,65	52	-9,67	107,89	-7,65
18	-9,92	101,86	8,1	53	-10,32	92,90	-8,1
19	-10,94	80,54	8,55	54	-11,31	73,96	-8,55
20	-11,85	65,31	9	55	-12,40	57,54	-9
21	-12,77	52,84	9,45	56	-13,26	47,21	-9,45
22	-14,16	38,37	9,9	57	-14,14	38,55	-9,9
23	-15,17	30,41	10,35	58	-15,48	28,31	-10,35
24	-16,66	21,58	10,8	59	-17,07	19,63	-10,8
25	-17,99	15,89	11,25	60	-18,09	15,52	-11,25
26	-19,60	10,96	11,7	61	-19,04	12,47	-11,7
27	-20,63	8,65	12,15	62	-20,57	8,77	-12,15
28	-21,68	6,79	12,6	63	-21,91	6,44	-12,6
29	-23,01	5,00	13,05	64	-22,96	5,06	-13,05
30	-24,10	3,89	13,5	65	-23,82	4,15	-13,5
31	-24,76	3,34	13,95	66	-24,96	3,19	-13,95
32	-25,33	2,93	14,4	67	-25,73	2,67	-14,4
33	-26,19	2,40	14,85	68	-26,48	2,25	-14,85
34	-26,93	2,03	15,3	69	-26,95	2,02	-15,3
35	-27,40	1,82	15,75	70	-27,64	1,72	-15,75

Tab. 4: Špeciálne optické vlákno SG1017 - LASERový zdroj žiarenia

číslo kroku	intenzita		uhol	číslo kroku	intenzita		uhol
	[dBm]	[nW]	[deg]		[dBm]	[nW]	[deg]
0	-2,08	619,44	0				
1	-2,11	615,18	0,45	36	-2,11	615,18	-0,45
2	-2,16	608,14	0,9	37	-2,18	605,34	-0,9
3	-2,23	598,41	1,35	38	-2,24	597,04	-1,35
4	-2,27	592,93	1,8	39	-2,29	590,20	-1,8
5	-2,31	587,49	2,25	40	-2,35	582,10	-2,25
6	-2,39	576,77	2,7	41	-2,47	566,24	-2,7
7	-2,60	549,54	3,15	42	-2,65	543,25	-3,15
8	-2,73	533,33	3,6	43	-2,84	520,00	-3,6
9	-2,87	516,42	4,05	44	-3,09	490,91	-4,05
10	-3,20	478,63	4,5	45	-3,61	435,51	-4,5
11	-4,39	363,92	4,95	46	-4,41	362,24	-4,95
12	-4,97	318,42	5,4	47	-5,03	314,05	-5,4
13	-5,66	271,64	5,85	48	-5,76	265,46	-5,85
14	-7,22	189,67	6,3	49	-7,05	197,24	-6,3
15	-8,88	129,42	6,75	50	-8,60	138,04	-6,75
16	-10,00	100,00	7,2	51	-9,80	104,71	-7,2
17	-11,21	75,68	7,65	52	-11,01	79,25	-7,65
18	-12,99	50,23	8,1	53	-12,87	51,64	-8,1
19	-14,51	35,40	8,55	54	-14,73	33,65	-8,55
20	-15,12	30,76	9	55	-15,42	28,71	-9
21	-16,34	23,23	9,45	56	-16,61	21,83	-9,45
22	-17,68	17,06	9,9	57	-18,03	15,74	-9,9
23	-18,95	12,74	10,35	58	-19,67	10,79	-10,35
24	-19,81	10,45	10,8	59	-20,39	9,14	-10,8
25	-20,76	8,39	11,25	60	-21,42	7,21	-11,25
26	-22,20	6,03	11,7	61	-22,49	5,64	-11,7
27	-23,76	4,21	12,15	62	-24,12	3,87	-12,15
28	-24,89	3,24	12,6	63	-25,54	2,79	-12,6
29	-26,06	2,48	13,05	64	-26,73	2,12	-13,05
30	-27,91	1,62	13,5	65	-28,08	1,56	-13,5
31	-29,44	1,14	13,95	66	-29,12	1,22	-13,95
32	-30,21	0,95	14,4	67	-29,80	1,05	-14,4
33	-30,81	0,83	14,85	68	-30,87	0,82	-14,85
34	-31,33	0,74	15,3	69	-31,56	0,70	-15,3
35	-32,66	0,54	15,75	70	-32,61	0,55	-15,75

Tab. 5: Mnohovidové optické vlákno 62,5/125 μm - LASERový zdroj žiarenia

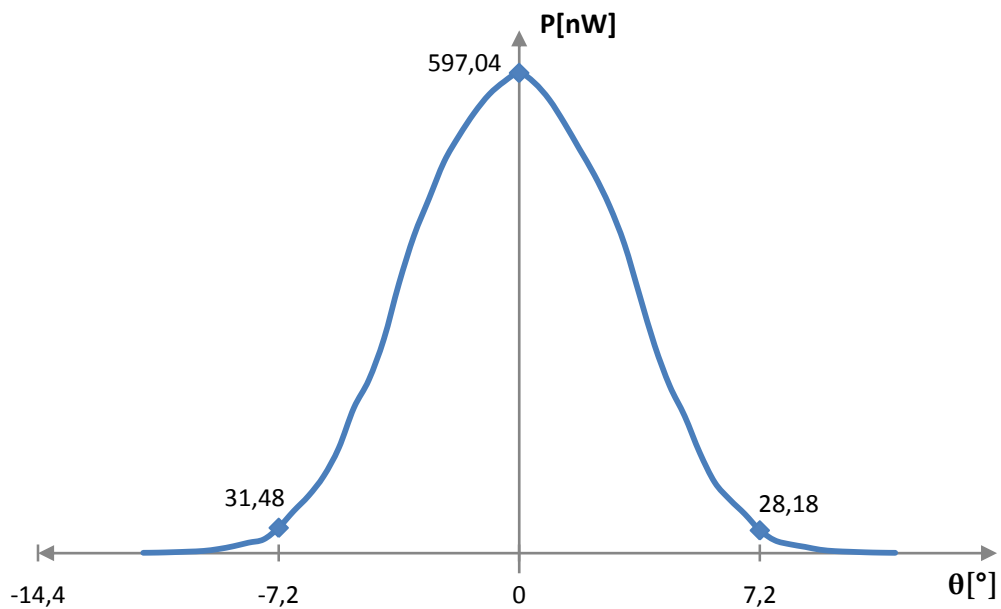
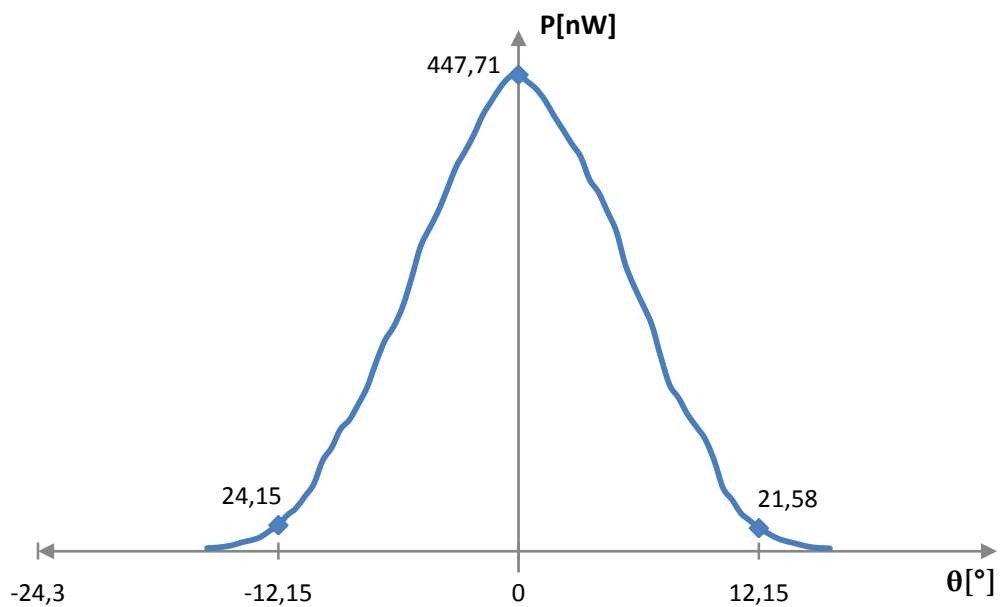
číslo kroku	intenzita		uhol	číslo kroku	intenzita		uhol
	[dBm]	[nW]	[deg]		[dBm]	[nW]	[deg]
0	-29,19	1205,04	0				
1	-29,22	1196,74	0,45	46	-29,22	1196,74	-0,45
2	-29,24	1191,24	0,9	47	-29,25	1188,50	-0,9
3	-29,28	1180,32	1,35	48	-29,31	1172,20	-1,35
4	-29,35	1161,45	1,8	49	-29,38	1153,45	-1,8
5	-29,44	1137,63	2,25	50	-29,44	1137,63	-2,25
6	-29,52	1116,86	2,7	51	-29,52	1116,86	-2,7
7	-29,60	1096,48	3,15	52	-29,65	1083,93	-3,15
8	-29,75	1059,25	3,6	53	-29,82	1042,32	-3,6
9	-29,94	1013,91	4,05	54	-29,94	1013,91	-4,05
10	-30,07	984,01	4,5	55	-30,06	986,28	-4,5
11	-30,23	948,42	4,95	56	-30,27	939,72	-4,95
12	-30,47	897,43	5,4	57	-30,53	885,12	-5,4
13	-30,73	845,28	5,85	58	-30,73	845,28	-5,85
14	-30,94	805,38	6,3	59	-30,96	801,68	-6,3
15	-31,20	758,58	6,75	60	-31,35	732,82	-6,75
16	-31,63	687,07	7,2	61	-31,84	654,64	-7,2
17	-32,14	610,94	7,65	62	-32,17	606,74	-7,65
18	-32,52	559,76	8,1	63	-32,54	557,19	-8,1
19	-32,95	506,99	8,55	64	-33,12	487,53	-8,55
20	-33,65	431,52	9	65	-33,78	418,79	-9
21	-34,36	366,44	9,45	66	-34,32	369,83	-9,45
22	-34,94	320,63	9,9	67	-35,02	314,77	-9,9
23	-35,59	276,06	10,35	68	-35,81	262,42	-10,35
24	-36,72	212,81	10,8	69	-37,00	199,53	-10,8
25	-37,91	161,81	11,25	70	-37,74	168,27	-11,25
26	-38,76	133,05	11,7	71	-38,58	138,68	-11,7
27	-39,77	105,44	12,15	72	-39,94	101,39	-12,15
28	-41,71	67,45	12,6	73	-41,93	64,12	-12,6
29	-43,02	49,89	13,05	74	-43,69	42,76	-13,05
30	-44,32	36,98	13,5	75	-45,28	29,65	-13,5
31	-45,75	26,61	13,95	76	-46,63	21,73	-13,95
32	-47,92	16,14	14,4	77	-48,82	13,12	-14,4
33	-49,52	11,17	14,85	78	-50,94	8,05	-14,85
34	-50,20	9,55	15,3	79	-51,82	6,58	-15,3
35	-51,61	6,90	15,75	80	-52,30	5,89	-15,75
36	-52,11	6,15	16,2	81	-53,24	4,74	-16,2
37	-53,64	4,33	16,65	82	-54,08	3,91	-16,65
38	-54,86	3,27	17,1	83	-54,99	3,17	-17,1
39	-55,44	2,86	17,55	84	-56,34	2,32	-17,55
40	-57,02	1,99	18	85	-57,55	1,76	-18

Tab. 6: Mnohovidové optické vlákno 50/125 μm - LED zdroj žiarenia

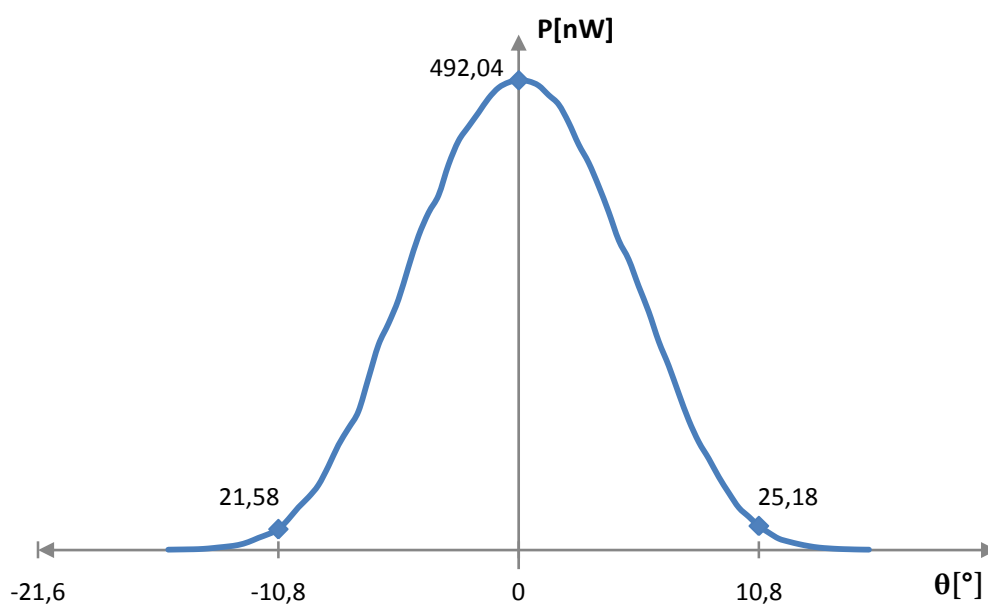
číslo kroku	intenzita		uhol	číslo kroku	intenzita		uhol
	[dBm]	[nW]	[deg]		[dBm]	[nW]	[deg]
0	-30,04	990,83	0				
1	-30,05	988,55	0,45	46	-30,05	988,55	-0,45
2	-30,07	984,01	0,9	47	-30,07	984,01	-0,9
3	-30,09	979,49	1,35	48	-30,11	974,99	-1,35
4	-30,11	974,99	1,8	49	-30,14	968,28	-1,8
5	-30,15	966,05	2,25	50	-30,18	959,40	-2,25
6	-30,21	952,80	2,7	51	-30,24	946,24	-2,7
7	-30,28	937,56	3,15	52	-30,31	931,11	-3,15
8	-30,34	924,70	3,6	53	-30,37	918,33	-3,6
9	-30,40	912,01	4,05	54	-30,44	903,65	-4,05
10	-30,50	891,25	4,5	55	-30,54	883,08	-4,5
11	-30,59	872,97	4,95	56	-30,67	857,04	-4,95
12	-30,68	855,07	5,4	57	-30,75	841,40	-5,4
13	-30,76	839,46	5,85	58	-30,85	822,24	-5,85
14	-30,92	809,10	6,3	59	-31,00	794,33	-6,3
15	-31,09	778,04	6,75	60	-31,17	763,84	-6,75
16	-31,23	753,36	7,2	61	-31,30	741,31	-7,2
17	-31,37	729,46	7,65	62	-31,45	716,14	-7,65
18	-31,59	693,43	8,1	63	-31,68	679,20	-8,1
19	-31,82	657,66	8,55	64	-31,97	635,33	-8,55
20	-32,00	630,96	9	65	-32,16	608,14	-9
21	-32,19	603,95	9,45	66	-32,37	579,43	-9,45
22	-32,56	554,63	9,9	67	-32,62	547,02	-9,9
23	-32,93	509,33	10,35	68	-33,02	498,88	-10,35
24	-33,18	480,84	10,8	69	-33,34	463,45	-10,8
25	-33,49	447,71	11,25	70	-33,64	432,51	-11,25
26	-33,97	400,87	11,7	71	-34,17	382,82	-11,7
27	-34,49	355,63	12,15	72	-34,82	329,61	-12,15
28	-34,92	322,11	12,6	73	-35,31	294,44	-12,6
29	-35,40	288,40	13,05	74	-35,83	261,22	-13,05
30	-36,28	235,50	13,5	75	-36,68	214,78	-13,5
31	-37,29	186,64	13,95	76	-37,66	171,40	-13,95
32	-38,01	158,12	14,4	77	-38,48	141,91	-14,4
33	-38,96	127,06	14,85	78	-39,31	117,22	-14,85
34	-40,14	96,83	15,3	79	-40,73	84,53	-15,3
35	-41,95	63,83	15,75	80	-42,46	56,75	-15,75
36	-43,02	49,89	16,2	81	-43,50	44,67	-16,2
37	-43,89	40,83	16,65	82	-44,22	37,84	-16,65
38	-45,63	27,35	17,1	83	-46,10	24,55	-17,1
39	-47,12	19,41	17,55	84	-47,33	18,49	-17,55
40	-47,80	16,60	18	85	-47,81	16,56	-18
41	-48,10	15,49	18,45	86	-48,22	15,07	-18,45
42	-48,64	13,68	18,9	87	-48,89	12,91	-18,9

43	-48,95	12,74	19,35	88	-49,16	12,13	-19,35
44	-49,32	11,69	19,8	89	-49,58	11,02	-19,8
45	-49,89	10,26	20,25	90	-49,97	10,07	-20,25

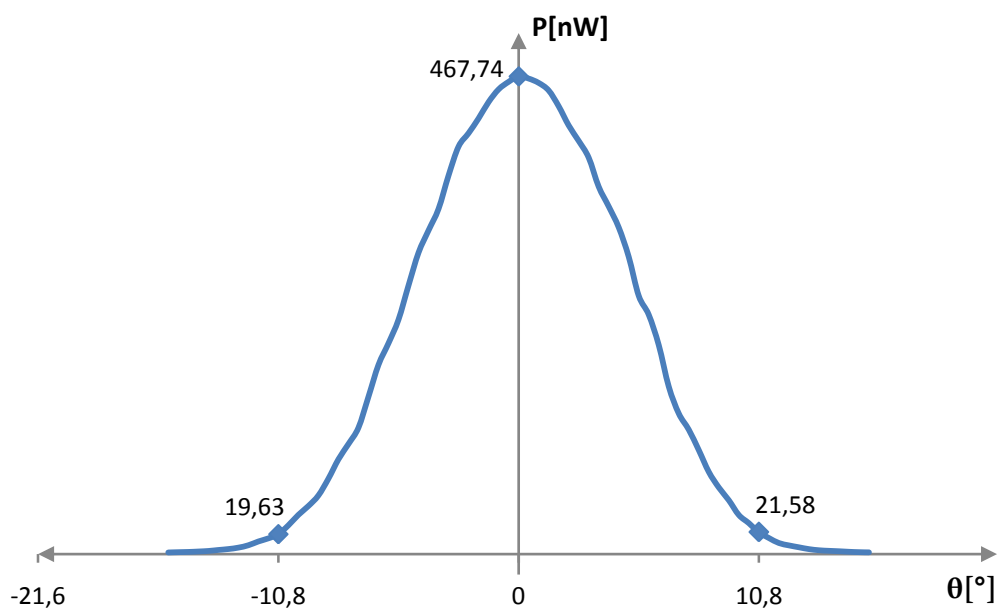
Tab. 7: Mnohovidové optické vlákno 62,5/125 μm - LED zdroj žiarenia

Príloha 2: Priebehy vyžarovacích charakteristík vlákienGraf 1: Jednovidové optické vlákno 9/125 μm - laserový zdroj žiarenia

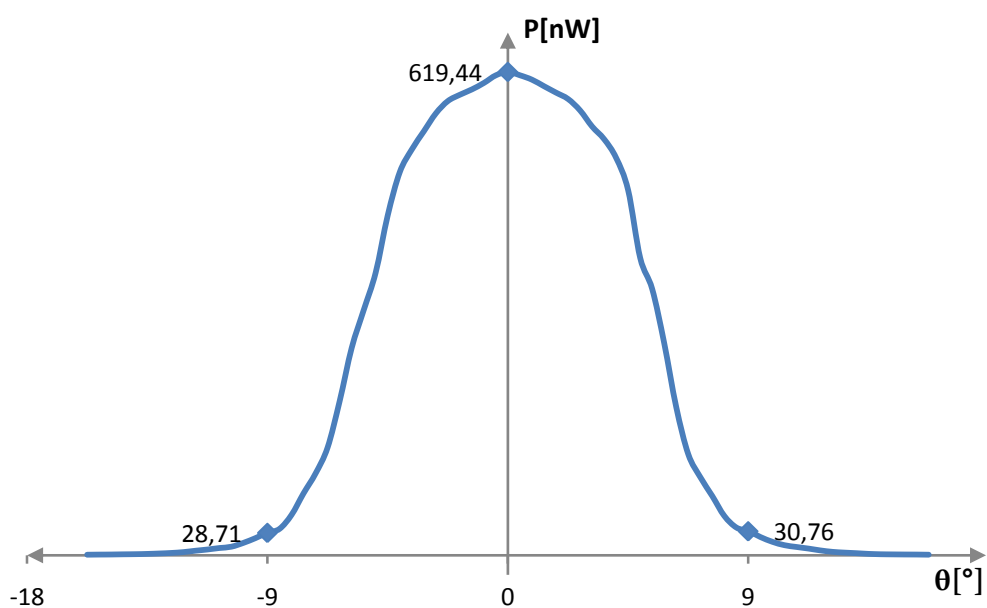
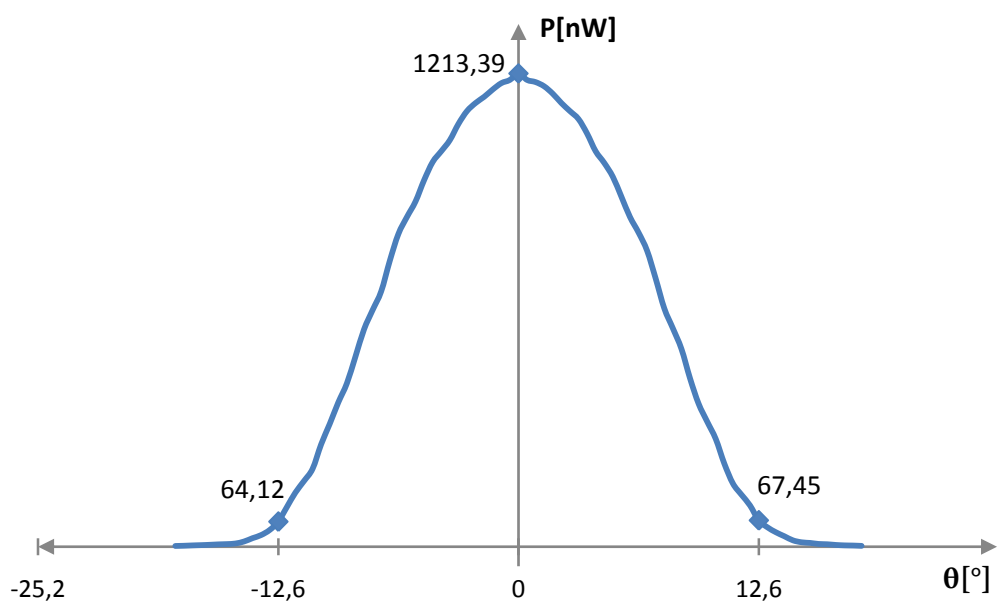
Graf 2: Špeciálne optické vlákno SG1005 - LASERový zdroj žiarenia

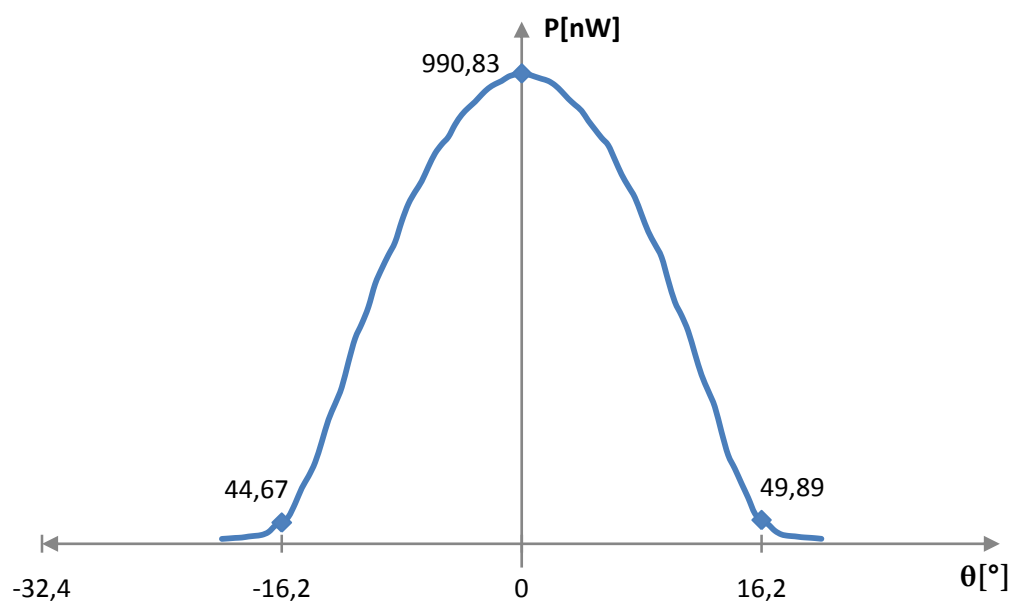


Graf 3: Špeciálne optické vlákno SG1006 - laserový zdroj žiarenia



Graf 4: Špeciálne optické vlákno SG1017 - laserový zdroj žiarenia

Graf 5: Mnohovidové optické vlákno 62,5/125 μm - LASERový zdroj žiareniaGraf 6: Mnohovidové optické vlákno 50/125 μm - LED zdroj žiarenia



Graf 7: Mnohovidové optické vlákno 62,5/125 μm - LED zdroj žiarenia